

Studienarbeit

Wirtschaftsingenieurwesen Maschinenbau Master v3

Modell zur Bewertung der Nachhaltigkeit eines technischen Produkts in der interdisziplinären Produktentwicklung am Beispiel von sail.Ing OWL

vorgelegt von
cand. B. Eng. Dominik Gräper
Matr.-Nr. 7247442

Nicht Freigegeben

Betreuende:

Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler
Dr. Jens Pottebaum

Paderborn, 02.11.2023

Projektarbeit Nr. 393

Modell zur Bewertung der Nachhaltigkeit eines technischen Produkts in der interdisziplinären Produktentwicklung am Beispiel von sail.Ing OWL

am: 02.11.2023

HEINZ NIXDORF INSTITUT

Universität Paderborn

Fachgebiet Produktentstehung

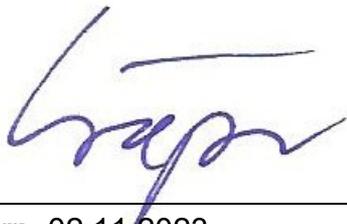
Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler

Fürstenallee 11

D-33102 Paderborn

Eidesstattliche Erklärung:

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.



Paderborn, 02.11.2023

Aufgabenstellung zur

Projektarbeit

Herr Dominik Gräper

Matr. Nr.: 7247442

Modell zur Bewertung der Nachhaltigkeit eines technischen Produkts in der interdisziplinären Produktentwicklung am Beispiel von sail.Ing OWL

Eine nachhaltigkeitsgerechte Produktentwicklung erfordert die Vorausschau auf alle Aspekte, die im Laufe eines Produktlebens Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit eines Produkts haben. Zielsetzung ist es, nicht nur negative Auswirkungen zu vermeiden, sondern eine positive Wirkung zu erzeugen. So soll beispielsweise auch die Rückgewinnung von Materialien nach einer endgültigen Außerbetriebnahme als wertschöpfender Prozess verstanden werden: Bauteile oder Werkstoffe werden zurückgewonnen, die in neuen Produkten verwendet werden können. In Zeiten der Ressourcenverknappung kann dies ein Hebel für wirtschaftlichen Erfolg und damit einen Wettbewerbsvorteil bedeuten. Die Studienarbeit bezieht sich dabei auf ein konkretes Produktbeispiel: ein Boot, das den Regularien des 1001 VELA CUP 2024 entsprechen und dabei in Bezug auf Nachhaltigkeit optimiert sein soll. Randbedingungen hinsichtlich der technischen Auslegung werden im Projekt sail.Ing OWL von Entwicklungs-Teams an verschiedenen Hochschulen in OWL und Lippstadt sukzessive definiert und verfeinert.

Aufgabe der Studienarbeit ist die Erarbeitung eines Modells zur Bewertung der Nachhaltigkeit eines solchen Produkts sowie die Prüfung der Anwendbarkeit von openLCA als Bewertungswerkzeug. Erste Randbedingungen sind in Bezug auf die Materialcharakterisierung in den Regularien des Wettbewerbs vorgegeben. Bewertungskriterien der nachhaltigkeitsgerechten Produktentwicklung sind zu literaturbasiert zu erheben, in Bezug zueinander zu setzen und zu priorisieren. Dabei sind insbesondere Ressourcenverwendung und Emissionsbilanzen zu berücksichtigen. Anhand einer prototypischen Umsetzung mit openLCA erfolgt die Prüfung, inwiefern eine in Bezug auf das entwickelte Modell vollständige Nachhaltigkeitsbewertung für das Boot möglich ist. Die Ergebnisse werden mit Interview-Partnern aus dem Entwicklungs-Team validiert. Die Übertragbarkeit auf andere Produkte und Branchen wird anhand der Ausgangsliteratur diskutiert

Fachgebiet: Nachhaltigkeitsgerechte Produktentwicklung
Betreuer: Dr.-Ing. Jens Pottebaum
Abgabedatum: 02.11.2023



Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler
Unterschrift

Dominik Gräper
Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abkürzungsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	IV
1 Einleitung	1
1.1 Problematik	1
1.2 Zielsetzung	1
1.3 Vorgehensweise	1
2 Stand der Technik.....	2
2.1.1 Sail.Ing	2
2.2 Technisches Produkt.....	2
2.2.1 International 1001Vela Cup.....	4
2.2.2 Schiffsbauprozess.....	5
2.2.2.1 Rumpf und Schwert.....	6
2.2.2.2 Ruder.....	6
2.2.2.3 Sensorik.....	8
2.2.2.4 Zukaufteile	9
2.3 Open LCA.....	9
2.4 Recherche	10
2.4.1 Strategie.....	11
2.4.2 Auswahl	11
2.4.3 Ergebnisse	12
2.5 Allgemeines zum Life Cycle Assessment.....	12
2.5.1 DIN ISO 14040:2006 und DIN ISO EN 14044:2006.....	13
2.5.1.1 Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmen	14
2.5.1.2 Sachbilanz	15
2.5.1.3 Wirkabschätzung.....	15
2.5.1.4 Auswertung.....	16
2.5.2 Greenhouse Gas Protocol.....	17
2.5.2.1 Scope 1	17
2.5.2.2 Scope 2	17
2.5.2.3 Scope 3	18
2.6 Kennzahlen	19

2.6.1	CO2.....	19
2.6.2	Energieverbrauch.....	20
2.6.3	Wasserfußabdruck.....	20
2.6.4	Landnutzung.....	22
2.6.5	Recycling.....	23
2.7	Datenbanken.....	23
3	Modellbildung mit open LCA.....	25
3.1	Rahmen der Ökobilanz.....	25
3.2	Sachbilanz.....	25
3.2.1	Sensorik.....	25
3.2.2	Ruder.....	27
3.2.3	Rumpf und Schwert.....	28
3.2.4	Restliche Zukaufteile und Endmontage.....	29
3.3	Wirkabschätzung.....	32
3.4	Auswertung.....	32
4	Prüfung der Ergebnisse.....	35
5	Bewertung von open LCA.....	36
6	Fazit.....	37
7	Literaturverzeichnis.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
	Glossar.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
	Anhang.....	1
Anhang		
A-1	Explosionszeichnung Ruder.....	A-1

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer
Büa	Breite über alles
CBF	Corporate Biodiversity Footprint
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CNC	Computerized Numerical Control
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung
ELCD	European reference Life Cycle Database
EN	Europäische Norm
FH	Fachhochschule
GHG	Greenhouse Gas
HSBI	Hochschule Bielefeld
HSHL	Hochschule Hamm-Lippstadt
ISO	International Organization for Standardization
kWh	Kilowattstunden
LCA	Lifecycle Assessment
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
LWL	Länge in der Wasserlinie
MWh	Megawattstunden
OWL	Ostwestfalen-Lippe
PEF	Product Environmental Footprints
TH	Technische Hochschule
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: RS500 Segeljolle mit Gennaker und Segler im Trapez [Zie23-ol]	3
Abbildung 2-2: Schematischer International 14 [Int23-ol]	4
Abbildung 2-3: Schiffsbauprozess	5
Abbildung 2-4: Endkonzept Ruder [PTD+23, S. 41]	7
Abbildung 2-5: Windex Verklicker [Win23-ol]	9
Abbildung 2-6: Beispiel open LCA-Produktsystem	10
Abbildung 2-7: Zusammenhang der Phasen einer Ökobilanz [DIN21a-ol]	14
Abbildung 2-8: Bestandteile der Wirkabschätzung [DIN21a-ol]	16
Abbildung 2-9: Scopes im GHG-Protokoll [Gre23-ol]	18
Abbildung 2-10: Konzept des Wasserfußabdrucks [DIN23-ol]	22
Abbildung 3-1: Verklicker open LCA-Prozess	26
Abbildung 3-2: Ruderfertigung open LCA-Prozess	28
Abbildung 3-3: Rumpffertigung open LCA-Prozess	29
Abbildung 3-4: Schwertfertigung open LCA-Prozess	29
Abbildung 3-5: Gesamtprozess Bootsbau	31
Abbildung 3-6: CO ₂ Äquivalente	33
Abbildung 3-7: Wasserfußabdruck	33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Materialgruppen Ruder	27
Tabelle 3-2: Ergebnisse für Kennzahlen	34

1 Einleitung

In dieser Arbeit soll im Kontext von sail.Ing exemplarisch eine Ökobilanz für ein Boot erstellt werden. Dieses soll regelkonform gefertigt werden und am International 1001 Vela Cup teilnehmen. Da hier bereits ein Rahmen für die Nachhaltigkeit dieses Produktes gesetzt ist, eignet es sich, um mithilfe von open LCA ein Modell zu erstellen und diese nachzuweisen.

1.1 Problematik

Da in der heutigen Zeit die Ressourcen immer knapper und die Auswirkungen des Klimawandels immer sichtbarer werden, gewinnen die Bereiche Umweltschutz und Nachhaltigkeit in unserer Gesellschaft eine immer größere Bedeutung. Durch schwindende Ressourcen ist daher besonders auf deren nachhaltigen Einsatz zu achten und darauf, diese möglichst lange nutzen zu können. Auch ist allgemein der Verbrauch von Ressourcen zu verringern oder alternativ, zu einer nachhaltigen Alternative umzuschwenken. Hier ist besonders die Kreislaufwirtschaft von Bedeutung, da so der Verbrauch reduziert werden kann.

1.2 Zielsetzung

Wie kann nun Umweltschutz und Nachhaltigkeit sichergestellt werden und wie lassen sich diese Auswirkungen sichtbar machen? Außerdem stellt sich die Frage, an welcher Stelle im Produktlebenszyklus diese Umweltbelastungen wie beispielsweise ein CO₂ Ausstoß auftreten? Wie viel Wasser wird während der Produktion verbraucht? Diese Fragen sollen in dieser Arbeit gestellt und beantwortet werden.

1.3 Vorgehensweise

Um diese Fragen aufzulösen, wird im Laufe dieser Arbeit eine Lebenszyklusanalyse, kurz LCA (Life Cycle Assessment) durchgeführt. Dies geschieht exemplarisch am Beispiel eines Bootes, welches im Rahmen von Sail.Ing gefertigt wird und im Anschluss am Vela Cup teilnehmen soll. Hierzu wurde als erstes eine Literaturrecherche durchgeführt. Hier wurden mögliche Kennzahlen und Methoden recherchiert, welche im Rahmen der LCA genutzt werden sollen, um mithilfe von open LCA ein geeignetes Modell für diesen exemplarischen Prozess zu bilden. Im Anschluss wurden die nötigen Daten erhoben. Dieses Modell wurde im Anschluss mit den erhobenen Daten aufgebaut, um eine Aussage über die Nachhaltigkeit und Ökobilanz treffen zu können. Als letzter Schritt dieser Arbeit folgt eine kritische Betrachtung der Ergebnisse und der Software open LCA.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird auf den Stand der Technik eingegangen. Dies beinhaltet sowohl die Rahmenbedingungen von Sail.Ing sowie des Vela Cups. Des Weiteren wird auf die durchgeführte Literaturrecherche und dessen Ergebnisse eingegangen. Hier wurden Kennzahlen sowie Methoden für eine LCA ermittelt und geeignete Datenbanken gesichtet. Außerdem wird generell die Methode der Ökobilanz erläutert.

2.1.1 Sail.Ing

Im Umfang des Projektes Sail.Ing des VDI OWL soll eine Jolle für den Wettbewerb des Vela Cups gefertigt werden. Bei Sail.Ing handelt es sich um ein hochschulübergreifendes Projekt. Hier wird von verschiedenen Einrichtungen ein Beitrag geleistet, dieses Boot zu fertigen. Die teilnehmenden Hochschulen sind dabei die Universität Paderborn, die Fachhochschule Bielefeld mit dem Campus Minden, die Hochschule Hamm-Lippstadt sowie die Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe. [VDI23-01]

Die TH OWL übernimmt in diesem Projekt die Konstruktion und Fertigung des Rumpfes und des Schwertes. Das Ruder wird am Campus Minden erstellt. Für die im Projekt erforderliche Messtechnik und für die im Boot verbauten und genutzte Sensoren ist die FH Bielefeld zuständig. Der Leichtbau und die Außendarstellung des Vorhabens wird von der HSHL geleitet. Zuletzt übernimmt die Uni Paderborn die Aufgabe des Eco Designs und der LCA. Diese Ergebnisse werden im Laufe dieser Arbeit erarbeitet.

2.2 Technisches Produkt

Für die zu erarbeitende LCA dient als technisches Produkt, welches betrachtet wird, dass in diesem Projekt gefertigte Boot.

Das geplante Boot basiert auf einer modifizierten International 14' Jolle nach Plänen von Uffa Fox aus dem Jahr 1939. Bei einer Jolle handelt es sich um kleine, offene und flachgehende Boote. Um der seitlichen Abdrift entgegenzuwirken haben sie ein senkrecht im Schwertkasten geführtes Steckschwert. [Int23-01; Deu08, S. 27]



Abbildung 2-1: RS500 Segeljolle mit Gennaker und Segler im Trapez [Zie23-01]

Abbildung 2-2 zeigt schematisch eine International 14 Jolle. Diese benötigt als Besatzung einen Vorschoter, welcher im Trapez segelt und einen Steuermann. In Abbildung 2-1 ist beispielhaft eine Jolle mit Gennaker, im Bild das Schwarze Vorsegel, sowie einem Vorschoter im Trapez gezeigt. Der Vorschoter ist dabei die vordere Person. [Deu08, S. 291]

Der Rumpf soll dabei im Leichtbau-Klinker aus heimischen Hölzern anstelle von Glasfaserverstärktem Kunststoff gefertigt werden. Geplant ist dabei, dass der Rumpf nicht klassisch geklinkert ist, sondern dass dieser umgekehrt geklinkert wird. Hieraus leitet sich auch der geplante Name des Bootes „Hersey“, zu Deutsch „Ketzerei“ ab, da durch diese Art der Klinkerung mit den klassischen Traditionen des Bootsbaus gebrochen wird. Der Mast besteht aus Aluminium und wird mit einem modernen radialgeschnittenen Segel geriggt. Außerdem soll das Boot mit einem Gennaker segeln, welcher an einem ausfahrbaren Bugspriet und Steckschwert befestigt ist. [RVS+23]

In der Abbildung ist der Gennaker als Nr. 1 gekennzeichnet. Das Bugspriet an welchen der Gennaker befestigt ist, ist mit Nr. 2 markiert. Das Steckschwert ist unter dem Rumpf (Nr. 3) als Nr. 4 zu erkennen. An Position 5 befindet sich in dem Bild das Vorsegel und direkt dahinter mit Nr. 6 das Großsegel, welches am Baum (Nr. 7) und Mast (Nr. 8) befestigt ist. Das Ruder samt Pinne ist am Heck des Bootes (Nr. 9) abgebildet.



Abbildung 2-2: Schematischer International 14 [Int23-ol]

2.2.1 International 1001Vela Cup

Der International 1001Vela Cup ist ein internationaler Segelwettbewerb, welcher in Italien stattfindet. Ziel dieses Wettbewerbs ist es, die Forschung und Entwicklung im Bereich der Nautik voranzutreiben. Dazu sollen studentische Gruppen Jollen fertigen, welche an der Regatta des Vela Cups teilnehmen. Der Wettbewerb findet in einer offenen

Klasse statt, das bedeutet, dass alles, was nicht explizit in den Regeln ausgeschlossen wurde, erlaubt ist. [the23-ol, S. 1]

Die maximale Länge des Bootes ist vom Reglement dabei auf 4,60°m beschränkt. Die Breite über alles, kurz Búa auf 2,10°m. Das Ruder sowie die Befestigung des Ruders sind von diesen Werten ausgeschlossen. Der Rumpf des Bootes muss aus einem Stück bestehen, das heißt, dass beispielsweise Katamarane nicht erlaubt sind, da diese aus einem doppelten Rumpf bestehen. Als maximale Segelgröße ist eine Gesamtsegelfläche von 33°m² festgelegt. Die Masthöhe des Bootes ist nicht beschränkt. [the23-ol, S. 5 ff.]

Die Regeln dieses Wettbewerbs legen dabei auch fest, dass Boote nur zum Wettbewerb zugelassen sind, wenn diese zu mindestens 75% aus Bio und/oder recycelten und/oder recyclebaren Materialien bestehen. Werden nur natürliche Materialien verwendet, so müssen diese 70% des Gewichtes ausmachen. Natürliche Materialien sind nach Reglement definiert als ein Material, welches von Pflanzen oder Tieren stammt. Ein Biomaterial ist durch biologische Prozesse abbaubar. Des Weiteren sind Materialien mit einem E-Modul von mehr als 100°Gpa, sowie Titan, Aramid Fasern und Kohlenstoff verboten. [the23-ol, S. 5]

Für das Boot muss ebenfalls ein LCA-Bericht mithilfe von Open LCA erstellt werden. Dabei sind nur die Parameter des fertigen Bootes miteinzubeziehen. Auf Open LCA und eine Ökobilanz im eigentlichen Sinne wird im Verlauf dieser Arbeit noch genauer eingegangen. [the23-ol, S. 7]

2.2.2 Schiffsbauprozess

In diesem Abschnitt soll auf den zugrundeliegenden Prozess des Schiffsbaus eingegangen werden. Dieser bildet die Grundlage für die Betrachtung der Nachhaltigkeit und ist vom Reglement gefordert. Der Prozess besteht dabei aus mehreren Abschnitten, welche von den jeweiligen Hochschulen durchgeführt werden. Nachfolgend zeigt Abbildung 2-3 den Gesamtprozess als Black-Box-Modell mit den wichtigsten Prozessschritten.

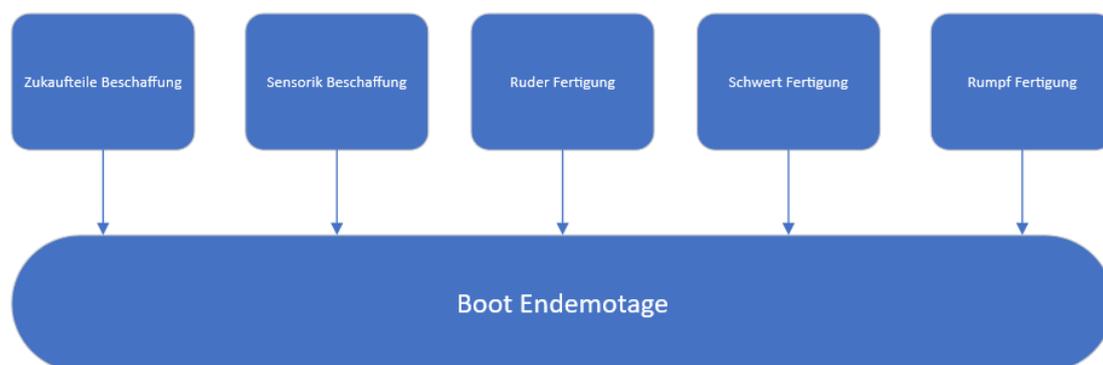


Abbildung 2-3: Schiffsbauprozess

2.2.2.1 Rumpf und Schwert

Da zum Zeitpunkt der Anfertigung dieser Arbeit die Planung und Fertigung der Baugruppe des Rumpfes sowie des Schwerts noch nicht abgeschlossen war, wird in diesem Teil auf einen exemplarischen Aufbau nach Literaturwerten eingegangen. Dies geschieht anhand der vom Projektteam gesetzten Rahmenbedingungen, sowie den Standarddaten zu einem typischen International 14.

Das Boot hat eine Standardrumpflänge von 4,2 m, was etwa 14 Fuß entspricht. Dies ist im Namen International 14 auch widergespiegelt. Diese Länge wird auch als Länge in der Schwimmwasserlinie, kurz LWL, bezeichnet. Der Rumpf hat eine Breite von 1,8 m. Ein typisches Rumpfgewicht liegt für diese Art des Bootes bei 70 kg. Dieses Gewicht wird für diesen Rumpf als Schätzwert genutzt. [Int23-ol]

Der Rumpf soll dabei aus heimischen Hölzern bestehen und umgekehrt geklinkert sein. Bei dieser Art der Rumpffertigung überlappen sich die einzelnen Holzplanken dachziegelartig. Zusammengehalten werden diese Planken klassischerweise durch Kupfernieten oder kupferne Schraubnägel. Geplant ist die entstandenen Fugen zwischen den Planken durch Flachfasern oder CFK-Rovings und Harz abzudichten. [Deu08, S. 32; RVS+23]

Es ist geplant das Schwert als Steckschwert herzustellen. Ein Steckschwert wird dabei, wie der Name bereits verdeutlicht, zum Segeln in den Rumpf eingesteckt. Es wird für dieses Projekt ebenfalls aus Holz gefertigt. [RVS+23; Deu08, S. 27]

2.2.2.2 Ruder

Das Ruder wurde an der HSBI am Campus Minden konzipiert und gefertigt. Als Endkonzept wurde dabei nach dem Durchlaufen mehrerer Konstruktionsschritte ein Ruder mit T-Foil herausgearbeitet. Dieses Endkonzept ist in Abbildung 2-4 gezeigt.



Abbildung 2-4: Endkonzept Ruder [PTD+23, S. 41]

Das Ruder besteht aus einer zweiteiligen Pinne aus Balsaholz. Das Ruder ist dabei mit einem Verstellmechanismus am Boot befestigt. Dieser ermöglicht es, die Rudereinstellung wie Einstichtiefe und Anstellwinkel während der Fahrt zu verändern. Dieser Mechanismus ist dabei eine selbstkonstruierte Aluminiumkonstruktion. Die einzelnen Teile werden von den Studierenden selbst gedreht und gefräst. [PTD+23]

Der Hauptteil des Ruderers besteht aus einer positivform, welche mithilfe eines 3D-Druckers additiv gefertigt wurde. Diese Positivform wird im Laminat belassen und dient somit gleichzeitig als innere Rahmenstruktur. Als Material für die Positivform wurde Polylactide, kurz PLA, gewählt. Dieses thermoplastische Polymer wird aus biologischen Materialien hergestellt, was es, neben seiner breiten Verfügbarkeit für den 3D-Drucker sowie seinem geringen Preispunkt, für dieses Projekt attraktiv macht. Da es aus biologischen Rohstoffen gewonnen wird, ist es biologisch abbaubar und fällt damit unter die Kategorie der Bio-Materialien. [PTD+23; Dom05, S. 1449 ff.]

Die Foils am unteren Ende des Ruders werden auf die gleiche Art und Weise wie der Mittelteil des Ruders gefertigt. Nachdem die 3D-Drucke erstellt wurden, werden diese laminiert. Dies geschieht beim Mittelteil des Ruders mithilfe von Flachsfasern. Die Foils

hingegen bestehen aus Kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK). Die Fertigungsschritte sind dabei gleich. Zuerst wird das Gewebe auf die positivform gelegt und anschließend mit Epoxidharz getränkt. Anschließend wird die nächste Lage Gewebe aufgelegt und erneut mit dem Harz bestrichen. Dies geschieht so oft, bis der Laminierungsplan abgeschlossen ist. Im Anschluss wird eine Lage Abreißgewebe aufgelegt und das Ganze in einem Vakuumsack gegeben. Dieser sorgt durch sein Vakuum zu einer Entfernung eingeschlossener Luft und ein besseres Aneinanderhaften der einzelnen Lagen. [PTD+23]

Die Laminierten Bauteile werden im Anschluss aus ihrem Vakuumsack entfernt und das Abreißgewebe abgerissen. Die Kanten der Bauteile müssen bei Bedarf entgratet und Überschuss abgeschnitten werden. Nun wird die Oberfläche noch einmal angeschliffen und poliert, um eine glattere und bessere Oberfläche zu erzielen. Bei Bedarf wird ebenfalls eine neue und dünne Harzschicht aufgetragen. [PTD+23]

Nachdem diese Schritte abgeschlossen sind, findet die Endmontage des Ruders statt. Eine detaillierte Explosionszeichnung ist noch einmal im Anhang A-1 zu finden.

2.2.2.3 Sensorik

Die Auslegung der Sensorik übernimmt ebenfalls eine Arbeitsgruppe der HSBI. Die Sensorik des Bootes wird dabei nicht in Eigenfertigung hergestellt, sondern hinzugekauft. Um die große Anzahl an Sensorik Instrumenten eingrenzen zu können, wurden verschiedene Konzepte und die unterschiedlichen Parameter, welche ermittelt werden sollen, gesammelt und ausgewertet. Auf Grundlage dieser Daten wurden verschiedene Messsysteme betrachtet, welche diese Parameter bestimmen können. [WRK+23]

Als wichtigste Parameter wurden die Windrichtung sowie Windgeschwindigkeit, Wassertiefe und GPS-Daten herausgearbeitet. [WRK+23]

Am Ende fiel hierbei die Auswahl auf einen Verklicker der Form „Windex“ und eine appgestützte Navigation. In Abbildung 2-5 ist ein Windex Verklicker gezeigt. Die App bietet den Vorteil, auf einem einfachen Smartphone zu laufen, was eine deutliche Gewichts- und Kosteneinsparung mit sich bringt. So kann auf ein teures und schweres Sonar zur Wassertiefenbestimmung verzichtet werden, da diese App Kartendaten mit dieser Information bietet. Außerdem ermöglicht die App auf aktuelle Karten- und Wetterdaten zuzugreifen und den geseelten Kurs zu plotten, was nur ein Navigationssystem, das Smartphone nötig macht. Die App wird hierbei nicht zur Bewertung in die zu erstellende Ökobilanz miteinbezogen, da diese sich nur auf die Fertigung des Bootes beziehen soll. [WRK+23]



Abbildung 2-5: Windex Verklicker [Win23-01]

2.2.2.4 Zukaufteile

Die restlichen Zukaufteile werden zur Endmontage des fertigen Bootes beschafft. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Seile und Kleinteile zum Riggen der Segel. Ebenfalls in diese Kategorie fällt die Beschaffung des Mastes und der Segel sowie des Gennaker. Der Mast besteht aus dem eigentlichen Mast sowie dem Baum. In diese Kategorie fällt auch das geplante Bugsprit.

2.3 Open LCA

Das Modell der LCA soll mithilfe der Software open LCA gebildet werden. Dies ist durch die Regeln des Wettbewerbs festgelegt. Open LCA ist ein Open Source Projekt zur Erstellung von Ökobilanzen, welches seit 2006 von Green Delta entwickelt wird. Mithilfe dieser Software können verschiedenen Aufgaben, wie beispielsweise das Erstellen von Ökobilanzen, CO₂- und Wasserfußabdrücke gelöst werden. Dazu können Datenbanken importieren werden, welche die für die jeweilige Aufgabe nötigen Umweltdaten enthalten. Auf die verschiedenen zur Verfügung stehenden Datenbanken im open LCA-Nexus wird später noch einmal eingegangen. [CDL+20-01, S. 11]

In open LCA stehen verschiedene Elemente zur Modellierung des Produktsystems oder Projektes zur Verfügung. In einem Projekt können dabei verschiedene Produktsysteme erstellt und miteinander verglichen werden. [CDL+20-01, S. 11 ff.]

Bei den Elementen wird vor allem zwischen einem Flow und einem Prozess unterschieden. Ein Flow stellt hierbei einen Elementarfluss dar. Also ein Produkt oder Material. Ein Prozess hingegen produziert entweder ein Material oder Produkt, oder wandelt diese um.

In den Elementarflüssen lassen sich zusätzlich noch die Eigenschaften ebendieser anpassen. Also beispielsweise die Länge oder die Masse. Sollte sich ein Elementarfluss oder Prozess noch nicht in der importierten Datenbank befinden, können diese selbst modelliert werden. [CDL+20-ol, S. 16 ff.]

Um nun eine Ökobilanz erstellen zu können muss das zu betrachtende Produkt, in diesem Fall das Boot, als Produktsystem definiert werden. Dieses System hat nun einen Input, was alle einzelnen Bauteile darstellt und einen Output, was das Boot darstellt. Die einzelnen Prozesse haben nun ebenfalls einen In- und Output. Dabei fließen vor allem Elementarflüsse in die einzelnen Prozesse und werden in diesen umgewandelt. Ein vereinfachtes Schaubild dieses In-Output-Graphen ist in Abbildung 2-6 gezeigt. [CDL+20-ol]

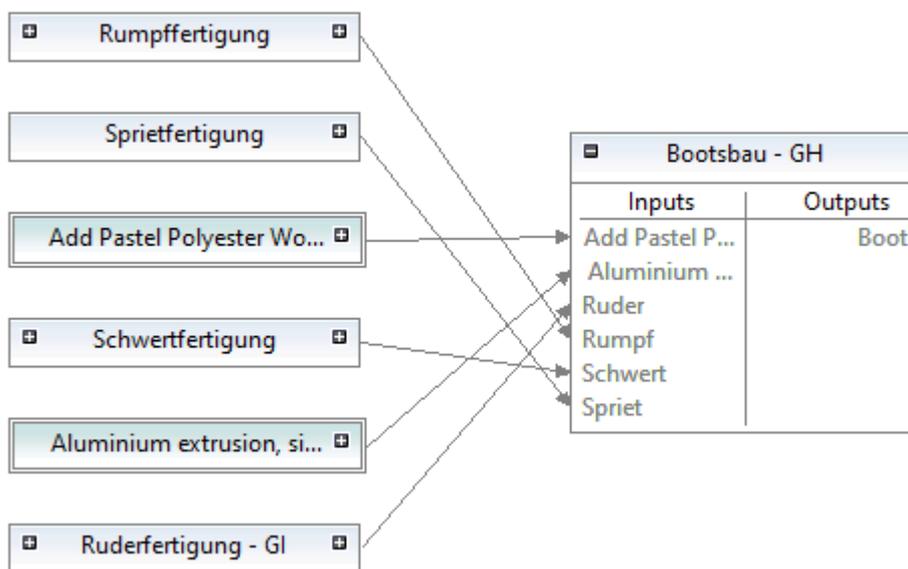


Abbildung 2-6: Beispiel open LCA-Produktsystem

Ist nun das fertige Produktsystem aufgebaut kann mit der Berechnung der Umweltauswirkungen begonnen werden. Hierzu muss nun noch eine „Life Cycle Impact Assessment Method“, kurz LCIA-Methode gewählt werden. Ist dies geschehen, wird von open LCA die Berechnung der einzelnen Einflussfaktoren auf die Umwelt begonnen. [CDL+20-ol]

Diese Ergebnisse schlüsseln nun auf, an welcher Stelle beispielsweise das meiste CO₂ produziert wird, oder in welchem Land eine besonders hohe Umweltverschmutzung auftritt, wenn das jeweilige Herstellungsland der Elementarflüsse bekannt ist.

2.4 Recherche

In diesem Abschnitt soll auf die Methode eingegangen werden, mit welcher die Kennzahlen und Methoden zur Durchführung der LCA ausgewählt wurden. Die Literaturrecherche als auch die Ergebnisse und der Auswahlprozess sind im Folgenden genauer beschrieben.

2.4.1 Strategie

Um die erforderlichen Kennzahlen und Methoden, um diese zu bestimmen, auszuwählen, wurde eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Dazu wurden als erste die Stichwörter „LCA“ und „Life Cycle Assessment“ in einer Onlinesuchmaschine eingegeben, um einen ersten groben Überblick über das Thema zu erhalten. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse konnten im Anschluss genutzt werden, um im Bibliothekskatalog der Universität Paderborn geeignete Quellen zu finden. Hier wurden besonders die Stichwörter „LCA, Life Cycle Assessment“ und der deutsche Ausdruck hierfür „Ökobilanz“ verwendet.

Nachdem die so gewonnenen Bibliotheksquellen eine gute Übersicht über das Thema geben konnten, wurde damit begonnen die Suche in seiner inhaltlichen Tiefe zu fokussieren. Dazu wurden verschiedene Datenbanken verwendet, um verschiedenen Fachzeitschriften zu durchsuchen. So konnte sich dem Thema der LCA im Boots- und Yachtbau genähert werden. Dazu wurden vor allem Suchmaschinen wie Google Scholar, Web of Science und Science Direct genutzt, da besonders englischsprachige Journals hochwertige Beiträge liefern können. Es wurde somit eine Strategie der Stichwortbasierten Suche in Datenbanken im Top-Down Prinzip angewendet. [WSS+17, S. 97; Kor18, S. 84 f.]

Aufgrund der so gewonnenen breiten Informationen konnte im weiteren Verlauf bei aufkommenden Wissenslücken zielgenau nach den benötigten Informationen gesucht werden.

2.4.2 Auswahl

Um die auf diese Weise gefundene Fachliteratur bewerten zu können, wurde vor allem das Inhaltsverzeichnis betrachtet. Zeigten sich hier bereits relevante Kapitel, wurden diese betrachtet. Dazu wurden sie quergelesen, um einen Eindruck ihrer Relevanz gewinnen zu können. Wurden auf diese Art interessante oder wichtige Informationen entdeckt, wurde das Werk als potenzielle Quelle aufgenommen.

Die potenziellen Quellen aus wissenschaftlichen Texten wurden im Anschluss gesammelt und in einem gemischten Vorgehen nach [Kor18] und [GHW18] ausgewählt. Dabei wurde als erstes der Titel der Quelle bewertet. Ist dieser relevant wird der Abstract der Quelle bewertet. Zeigt dieser bereits, dass die Quelle irrelevant ist, wird diese verworfen. Im Anschluss werden in Anlehnung nach [GHW18] die Abbildungen betrachtet und es findet eine Zuordnung nach Relevanz statt. Zeigen sich die Abbildungen als relevant wird als letzter Schritt der Schlussteil betrachtet. Wenn dieser relevant ist, wird die Quelle aufgenommen. Andernfalls wird diese verworfen.

2.4.3 Ergebnisse

Die so gewonnenen Informationen zeigten, dass bereits eine gute internationale Grundlage zum Erstellen von Ökobilanzen besteht. Dies wird geregelt durch die Normen DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044. Diese werden im weiteren Verlauf als erstes betrachtet. Auf Grundlage dieser Normen gibt es ebenfalls weitere umfangreichere Methoden zum Erstellen einer LCA. Hier hat sich vor allem das Greenhouse Gas Protocol international durchsetzen können [Eur23-ol]. Auf diese Methode wird auch noch einmal genauer eingegangen und gegen die ISO-Normen abgegrenzt.

Um ein besseres Verständnis über Boote im Allgemeinen und den damit verbundenen Bootsbau gewinnen zu können, zeigte sich vor allem das Buch „Seemannschaft“ als große Hilfe. Hierbei handelt es sich um eine Art Duden für den Yachtsport, welcher alle Bauteile eines Bootes und die verschiedenen Bauformen sehr gut erklärt. Somit konnte ein gutes Verständnis für den Gesamtprozess des Bootsbaus geschaffen werden.

Die durch diese Recherche definierten Kennzahlen sollen in Kapitel 2.6 noch genauer erläutert werden. Dort wird auch aufgezeigt, warum gerade diese Kennzahlen für dieses Projekt ausgewählt wurden.

Das Gesamtergebnis der Literaturrecherche ist durch das Literaturverzeichnis abgebildet.

2.5 Allgemeines zum Life Cycle Assessment

Dieser Abschnitt der Arbeit soll sich mit den Grundlagen des Life Cycle Assessment befassen. In einem im Jahr 2011 durchgeführten Vergleich zwischen drei Methoden, welche zu einer Ökobilanz führen, konnte ein Unterschied zwischen den einzelnen Ergebnissen aufgedeckt werden, jedoch führte jede dieser Methoden zu einem ähnlichen Ergebnis. Die Methoden welche verglichen wurden waren die ISO-Norm 14044, die PAS 2050 und das Confederation of European Paper Industries (CEPI) framework. Verglichen wurde in dieser Studie das Treibhauspotential von einem DIN-A4-Blatt Papier. Dabei zeigte sich, dass die ISO 14044 Norm etwa 98 % der Treibhausgase aufdecken konnte und die einfachste Art der Datenermittlung aufwies. Alle drei verglichenen Methoden konnten jedoch den Hotspot der Emissionen aufdecken. Aus diesem Grund wurde entschieden, sich auf die ISO-Norm für dieses Projekt zu beziehen. [DA12]

Um eine internationale Vergleichbarkeit von Ökobilanzen zu schaffen, wurden die wichtigsten Grundsätze und Methoden in den Normen DIN EN ISO 14040, welche die Ökobilanzierung beschreibt, sowie in der DIN EN ISO 14044, welche die Anforderungen zur Erstellung der Ökobilanz und eine Anleitung zum Erstellen vorgibt, erstellt. Auf diese beiden Normen und Industriestandards soll in diesem Abschnitt eingegangen werden. [DIN21a-ol; DIN21b-ol]

2.5.1 DIN ISO 14040:2006 und DIN ISO EN 14044:2006

Die DIN ISO 14040 gibt die Grundsätze und Rahmenbedingungen für eine Ökobilanz vor. Eine Ökobilanz, oder im englischen Life Cycle Assessment, dient dazu, ein besseres Verständnis und eine Berücksichtigung der Auswirkungen auf die Umwelt eines Produktes zu generieren. Sie kann dabei helfen neue Wege aufzuzeigen, um die Umwelteigenschaften eines Produktes über seine verschiedenen Phasen des Lebensweges zu verbessern. Der Lebensweg ist nach Norm dabei definiert von der Rohstoffgewinnung bis zur endgültigen Beseitigung. Außerdem kann sie eine wichtige Informationsquelle für Entscheidungsträger sein und das Marketing eines Produktes beeinflussen. Ein weiterer Punkt ist die Hilfe beim Auswählen von Indikatoren für Umwelteigenschaften und der zugehörigen Messverfahren. [DIN21a-01]

Eine Ökobilanz besteht dabei aus den vier Schritten

1. Festlegung von Zielen und Untersuchungsrahmen
2. Sachbilanz
3. Wirkabschätzung
4. Auswertung

welche im Nachfolgenden noch genauer erläutert werden [DIN21a-01, S. 7]. Die Zusammenhänge der einzelnen Phasen einer Ökobilanz sind noch einmal in Abbildung 2-7 dargestellt.

Eine Ökobilanz nach DIN 14040 betrachtet dabei den gesamten Lebensweg. Einschließlich der Rohstoffgewinnung, Energieerzeugung bis hin zum Ende seines Lebens und der endgültigen Beseitigung. Da es sich um einen iterativen Ansatz handelt, können im Laufe der Durchführung dieser Bilanz bereits abgeschlossenen Schritte noch erweitert und ergänzt werden, womit sich der Umfang und das Ergebnisse im Laufe der Durchführung durchaus noch ändern können. Ebenso ist auch eine Neudefinierung der Ziele im Laufe der Ökobilanz möglich, wenn neue Erkenntnisse im Laufe dieser gewonnen werden. [DIN21a-01]

In einer solchen Ökobilanz wird das betrachtete Produkt dabei als dessen Produktsystem, welches eine oder mehrere Funktionen ausführt, betrachtet. Das System wird dabei nicht durch das Endprodukt, sondern durch seine Funktion bestimmt. Das Produktsystem ist wiederum in sich durch verschiedene Gruppen von Prozessmodulen unterteilt, welche durch Flüsse von Zwischenprodukten oder Abfällen miteinander verbunden sind. [DIN21b-01]

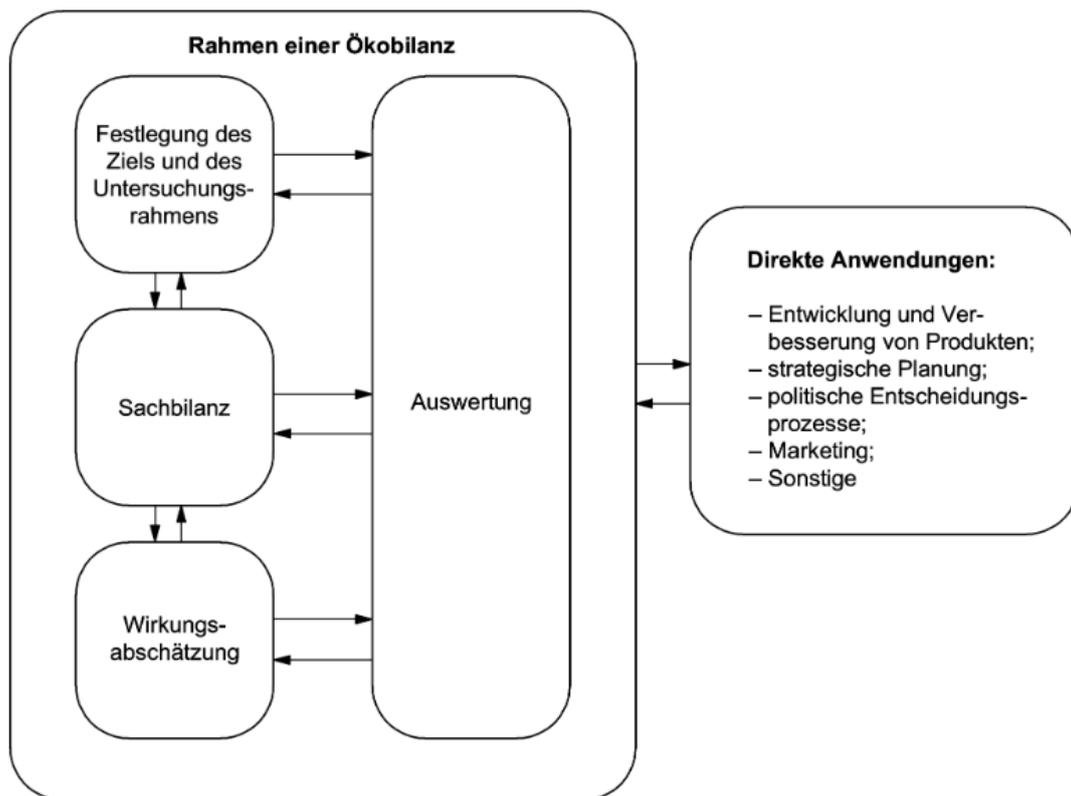


Abbildung 2-7: Zusammenhang der Phasen einer Ökobilanz [DIN21a-01]

2.5.1.1 Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmen

Als erster Schritt werden für eine LCA die Ziele sowie der Untersuchungsrahmen definiert. Dabei ist die beabsichtigte Verwendung, die angesprochene Zielgruppe und die Gründe zur Durchführung der Studie zu benennen. Zum Untersuchungsrahmen gehört das zu untersuchende Produktsystem, mit den Funktionen des Produktsystems, sowie den zugehörigen funktionellen Einheiten und Systemgrenzen. [DIN21a-01]

Die Festlegung der Systemgrenzen legt dabei die miteinzubeziehenden Prozessmodule fest. Sollten Prozesse, In-/Outputs oder Lebenswegabschnitte weggelassen werden, so ist dies zu begründen und zu dokumentieren. Hilfreich ist es hierfür die Prozesse anhand eines Systemfließbildes zu beschreiben. Dabei sollen die einzelnen Prozessmodule hinsichtlich ihrer In- und Outputs, sowie ihrer Arbeitsschritte und End- bzw. Zwischenprodukte definiert werden. Idealerweise treten an den Prozessgrenzen nur Elementar- und Produktflüsse auf. [DIN21b-01]

Hier wird außerdem das Allokationsverfahren und die Methode zur Wirkungsabschätzung definiert. Ein weiterer festzulegender Punkt ist die Anforderung an die Datenqualität, um die Zuverlässigkeit der Studie sicherzustellen. [DIN21a-01, S. 20 ff.]

2.5.1.2 Sachbilanz

Die zweite Phase einer Ökobilanz ist die Sachbilanz-Studie. Diese besteht aus drei Phasen. Diese beinhalten als erstes wieder eine Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens. Als zweite Phase folgt nun die eigentliche Sachbilanz, welche im dritten und letzten Schritt ausgewertet wird. [DIN21a-01]

Innerhalb dieser Sachbilanz findet nun die eigentliche Datenerhebung und das Berechnungsverfahren zur Quantifizierung der relevanten Systemflüsse statt. Da es sich dabei um einen iterativen Prozess handelt, können während der Datenerhebung neue Anforderungen oder Einschränkungen aufgedeckt werden. Dies kann gegebenenfalls zu einer Änderung des Ziels oder des Untersuchungsrahmens führen. [DIN21a-01]

Die Datenerhebung kann innerhalb der Systemgrenzen in einige beispielhafte Hauptgruppe eingeteilt werden. Diese umfassen die Energieinputs, Produkte, Koppelprodukte und Abfälle, sowie Emissionen beispielsweise in die Luft oder Verunreinigung von Gewässern. [DIN21a-01]

Die Daten könne dabei auf verschiedene Arten erhoben werden. So ist beispielsweise eine Erhebung am Produktionsstandort möglich. Sollte dies nicht möglich sein, können die erforderlichen Daten auch anderen Quellen entnommen oder errechnet werden. In der Praxis können all diese Datenkategorien genutzt werden. [DIN21b-01]

Nachdem die erforderlichen Daten erfasst worden sind, müssen diese durch geeignete Berechnungsverfahren validiert und in Bezug auf die Prozessmodule gesetzt werden. Sollten dabei mehrere Produkte erzeugt oder verwertet werden kann ein Allokationsverfahren nötig werden, um dies zu berücksichtigen. [DIN21a-01]

2.5.1.3 Wirkabschätzung

Nachdem die Sachbilanz aufgestellt wurde, erfolgt im Anschluss eine Wirkabschätzung der gesammelten Ergebnisse. Dabei wird die Bestimmung der potenziellen Umweltwirkungen angestrebt. Dazu werden die Sachbilanzdaten mit spezifischen Wirkungskategorien und Wirkungsindikatoren verknüpft und die hieraus potenziellen Umweltwirkungen zu erkennen. [DIN21a-01]

Eine Wirkabschätzung hat dabei eine Reihe an verbindlichen Bestandteilen und einige optionale Bestandteile. Diese Bestandteile sind in Abbildung 2-8 aufgezeigt.

Die Grenzen der Wirkabschätzung liegen dabei im festgelegten Ziel des Untersuchungsrahmens, da nur diese Aspekte betrachtet werden. Aus diesem Grund kann eine solche Wirkabschätzung keine vollständige Einschätzung aller Umweltaspekte abdecken. Des Weiteren können Einschränkungen in der Sachbilanzphase im Rahmen der Systemgrenzen, oder durch Datenlücken vorliegen. Außerdem kann die Wirkabschätzung aufgrund einer ungenügenden Qualität innerhalb der Sachbilanzphase oder durch Einschränkungen in der Sammlung der Sachbilanzdaten an seine Grenzen geführt werden. [DIN21a-01]

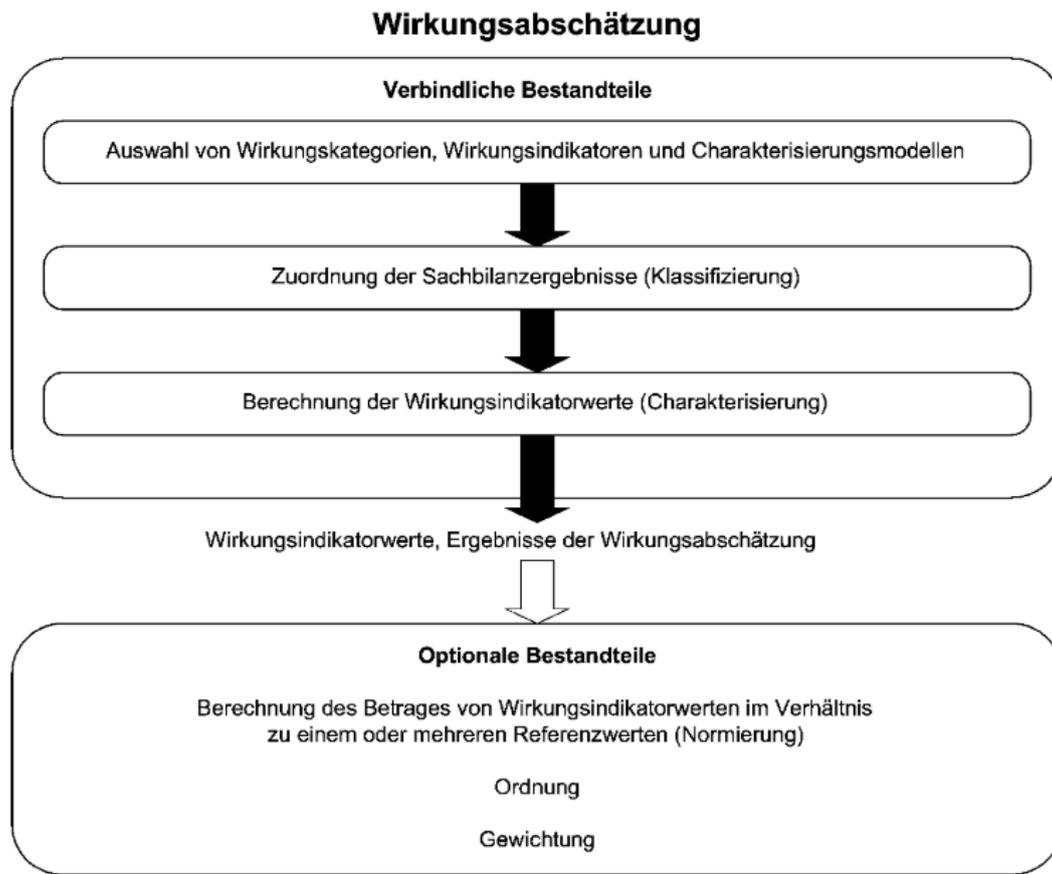


Abbildung 2-8: Bestandteile der Wirkabschätzung [DIN21a-01]

2.5.1.4 Auswertung

Im letzten Schritt einer Ökobilanz werden die Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkabschätzung gemeinsam betrachtet. Dies sollte nun Ergebnisse liefern, welche mit dem festgelegten Ziel und Untersuchungsrahmen übereinstimmen. Hieraus sollen nun Schlussfolgerungen, Erläuterungen und Einschränkungen zum Aussprechen von Empfehlungen abgeleitet werden. Wichtig ist hierbei zu betonen, dass es sich um einen relativen Ansatz handelt, welcher keine tatsächlichen Wirkungen und Umweltbelastungen anzeigt, sondern nur potenzielle Quellen aufgedeckt werden. [DIN21a-01]

Im Anschluss an die Auswertung wird ein Bericht erstellt. Dieser soll die zuvor beschriebenen Phasen beinhalten und die erarbeiteten Ergebnisse der angesprochenen Zielgruppe mitteilen. Dabei sollen die genutzten Daten, Verfahren und Annahmen genannt werden. [DIN21a-01]

Als letztes müssen die Ergebnisse einer Ökobilanz noch eine kritische Prüfung durchlaufen. Dabei wird geprüft, ob die Anforderungen an die Methodik, Daten, Auswertung und Berichterstattung erfüllt wurden. Diese Punkte werden bereits in der Vorbereitungsphase und in dem Untersuchungsrahmen festgelegt. Die kritische Prüfung dient dem besseren Verständnis und erhöht die Glaubwürdigkeit einer Ökobilanz. [DIN21a-01]

Eine kritische Prüfung kann dabei entweder durch einen externen oder internen Sachverständigen erfolgen oder durch einen Ausschuss der interessierten Kreise. [DIN21a-01]

2.5.2 Greenhouse Gas Protocol

Das Greenhouse Gas Protocol, kurz GHG Protocol, ist ein international anerkanntes und genutztes Verfahren zur Bestimmung von Umweltbelastungen. Als Grundlage dienen hierzu die DIN EN ISO 14040 und die DIN EN ISO 14044. Das GHG Protocol geht dabei noch über diese Normen hinaus. Ziel dieses Verfahrens ist es dabei eine noch genauere Bestimmung der Treibhausgase zu erreichen. [WW04]

Im GHG-Protokoll wird dazu zwischen drei Scopes unterschieden. Diese Scopes beschreiben drei Bereiche in denen Treibhausgase auftreten können. Hierdurch lässt sich eine genauere Aufschlüsselung der Emissionen im Verlauf des Produktlebenszyklus erzielen. Ein weiterer Vorteil des GHG-Protokolls ist die Tatsache, dass dieses bereits in open LCA hinterlegt ist, was die Berechnung der auftretenden Emissionen vereinfacht. [WW04]

Die drei Scopes des GHG-Protokolls sollen im Folgenden noch einmal kurz genauer behandelt werden.

2.5.2.1 Scope 1

Scope 1 sind alle im eigenen Unternehmen direkt anfallenden Emissionen. Diese Emissionen treten dabei in direkt vom Unternehmen besessenen Quellen auf. Dabei sollen in Scope 1 nur Emissionen aufgenommen werden, welche im Kyoto-Protokoll definiert wurden. Sollten weitere Schadstoffemissionen auftreten, so sind diese gesondert aufzuführen. [WW04]

Die Emissionen können dabei durch Erzeugung von Strom, Dampf oder Wärme auftreten. Ebenfalls möglich ist das Auftreten von Emissionen während der Herstellungsprozessen von Gütern. Ebenfalls in Scope 1 fallen alle Emissionen des eigenen Fuhrparks. [WW04]

2.5.2.2 Scope 2

Das Scope 2 beschreibt den Energieverbrauch. Hier werden die verbrauchten Energien Elektrizität, Dampf, Heizen und Kühlen zusammengefasst, unter dem Begriff Elektrizität. Die Herstellung dieser Energien erfolgt dabei nicht im Unternehmen selbst. Es handelt sich hierbei um indirekte Emissionen, da diese eben nicht direkt von Unternehmen erzeugt werden. [WW04]

Das Scope 2 ist eine der größten Quellen der Emissionen, woraus sich ein großes Potential zur Einsparung im Energiesektor bildet. Um diese Emissionen zu berechnen, wird empfohlen die verbrauchte Energie in MWh mit einem Lieferantenspezifischen Faktor zu multiplizieren. [WW04]

2.5.2.3 Scope 3

Der Scope 3 ist ein optionaler Bestandteil des GHG-Protokolls. Er umfasst alle anderen anfallenden Emissionen. [WW04]

Dabei wird zusätzlich noch zwischen Upstream Activities und Downstream Activities unterschieden. Als Upstream Activities werden alle dem eigenen Prozess vorgelagerten Prozesse bezeichnet. Dies umfasst also alle eigenen Lieferanten. Downstream Activities sind alle Prozesse, welche dem eigenen Prozess nachgelagert sind. Also beispielsweise die Kunden des eigenen Unternehmens. [WW04]

Die in diese indirekten Emissionen fallen Kategorien, sowie die drei Scopes sind in Abbildung 2-9 gezeigt.

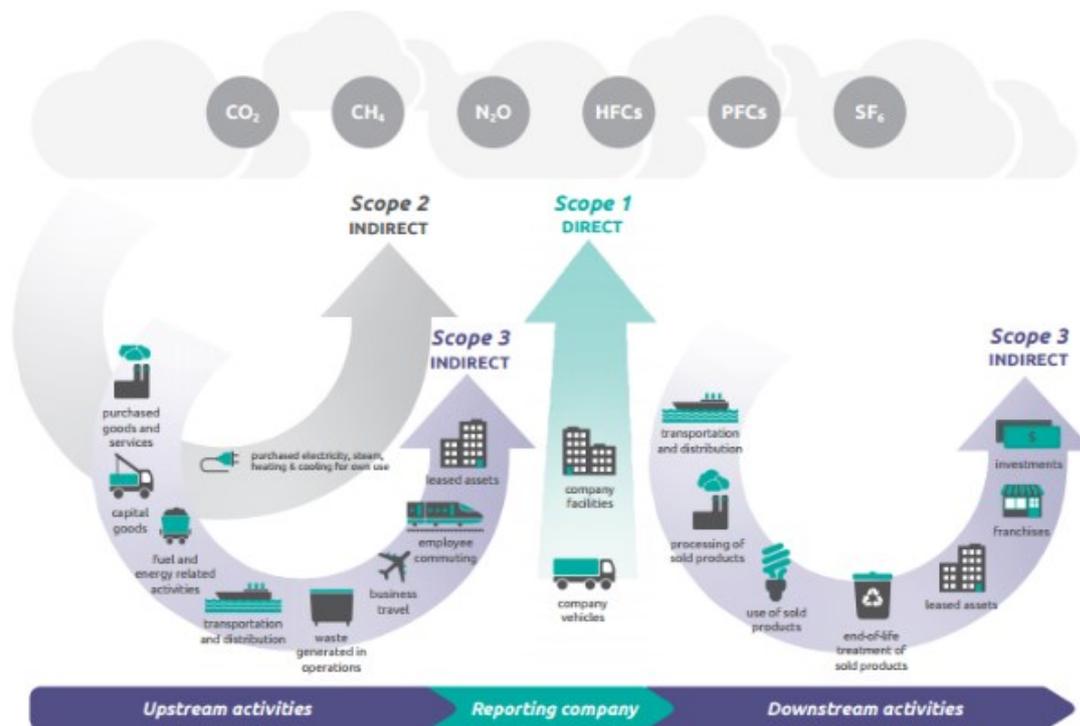


Abbildung 2-9: Scopes im GHG-Protokoll [Gre23-ol]

2.6 Kennzahlen

In diesem Abschnitt wird auf die wichtigsten Kennzahlen eingegangen, welche mithilfe der Ökobilanz ermittelt und bestimmt werden sollen. Die Auswahl dieser Kennzahlen erfolgte dabei mithilfe der zuvor in Kapitel 2.4 beschriebenen Literaturrecherche.

Als erste Grundlage zur Auswahl der Kennzahlen diente der Corporate Biodiversity Footprint, kurz CBF. Dieser umfasst die vier Kennzahlen Klimaerwärmung, Luftverschmutzung, Wasserverschmutzung, und Landnutzung. Dieser Fußabdruck hat dabei ebenfalls das GHG-Protokoll als Grundlage, geht aber auch über dieses hinaus. Da es sich beim CBF jedoch um eine Methode für Unternehmen handelt, konnte diese nicht für ein einzelnes Produkt wie das Boot genutzt werden und diente somit nur als Grundlage und Anstoß für das Aufstellen relevanter Kennzahlen. [Clé23-ol]

Die darauf aufbauend ausgewählten Kennzahlen sind im Folgenden erläutert.

2.6.1 CO₂

Als erste Kennzahl ist das CO₂ und die CO₂ Äquivalente zu nennen. Hierbei handelt es sich um eine Standardkennzahl im Bereich der Ökobilanzen und des Umweltschutzes. So ist diese wie bereits beschrieben ein Bestandteil für das GHG-Protokoll und umfasst etwa den Bereich der Luftverschmutzung und den Klimawandel im CBF. Die Wahl dieser Kennzahl und der miteinzubeziehenden Gase erfolgt dabei auf Grundlage der bereits beschriebenen Methoden des GHG und CBF sowie vorrangig des Kyoto Protokolls, welches als internationales Abkommen die wichtigsten Treibhausgase definiert hat. Darunter fallen die sechs Gase:

- Kohlendioxid (CO₂)
- Methan (CH₄)
- Distickstoffoxid (N₂O)
- Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW/HFC)
- Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/PFC)
- Schwefelhexafluorid (SF₆) [Ver98-ol]

Diese sechs Gase werden dabei auf einen Äquivalenten Wert in CO₂ umgerechnet, um eine Vergleichbarkeit unter den einzelnen Stoffen zu erhalten. Zum Beispiel entspricht Methan etwa der 25-Fachen Menge an CO₂. Diese Gase sind somit in den CO₂ Ausstoß miteinberechnet und sollten daher ebenfalls einbezogen werden. Da auch Deutschland sich dazu verpflichtet hat, den Ausstoß von CO₂ zu verringern, ist die Einbeziehung dieser Gase als CO₂ Äquivalente sinnvoll. Zusätzlich schreibt das EU-Umweltmanagementsystem EMAS vor, mindestens diese sechs Gase in der Berechnung des CO₂ Ausstoßes in einer gemeinsamen Kennzahl miteinzubeziehen. [WML13; Umw23-ol; Ver98-ol]

Zur Bestimmung dieser Kennzahl kann die Normenreihe der ISO 14064 genutzt werden. Diese gibt Aufschluss über die Quantifizierung und Validierung sowie Berichterstattung über eine im Unternehmen erstellte Ökobilanz. Des Weiteren bietet diese Normenreihe auch einen Leitfaden für Projektbezogene Bilanzen und Deklarationen des Carbon Footprint. [DIN19-ol]

2.6.2 Energieverbrauch

Da ein Großteil der CO₂ Emissionen im Energiesektor, also im Scope 2, zu erwarten sind, soll der Energieverbrauch als Kennzahl aufgenommen werden. Im aktuellen Deutschen Strommix stellte die Kohleenergie 2022 mit einem Anteil von etwa 33 % den größten Teil dar. Dies führt zu einem erhöhten CO₂ Ausstoß im Vergleich zu rein erneuerbaren Energien, welche im Jahr 2023 bereits 61 % der erzeugten Energie ausmacht. [Sta23-ol; Sta23-ol]

So werden zur Produktion der einzelnen Bauteile aufwendige Ur- und Umformprozesse genutzt. Dieser Energieverbrauch soll ermittelt werden und in die Kennzahl der CO₂ Emission mit einfließen. Im GHG-Protokoll wäre dieser Energieverbrauch zur Halbzeugfertigung in Scope 3 enthalten. So lässt sich eine Abgrenzung erzielen, welcher Anteil aus dem Energieverbrauch hervorgeht. Dies ist so auch im GHG-Protokoll als Scope 2 gefordert. [WW04]

2.6.3 Wasserfußabdruck

Da im CBF eine Wasserverschmutzung angegeben wird, soll dies auch für dieses Produkt verwendet werden. Da das Produktsystem hier ein Boot ist, eignet sich auch thematisch der Wasserfußabdruck und darin inbegriffen der Wasserverbrauch und die Wasserverschmutzung ebenfalls als Kennzahl. Dies kann einen positiven Marketingeffekt erzielen. So empfiehlt das Umweltbundesamt in seinem Leitfaden für Betriebliche Kennzahlen den Wasserverbrauch mitaufzunehmen. In Deutschland fallen dabei etwa 60 % des Wasserverbrauchs im Bereich der Energieversorgung zur Kühlung an. [WML13]

Ein weiterer Grund zur Nutzung dieser Kennzahl ist, dass im Vela Cup Wettbewerb Natürliche und Biomaterialien für das Boot genutzt werden müssen. Im Bootsbau handelt es sich hierbei vor allem um Holz, welches zur Rumpffertigung genutzt wird. Außerdem kann gegebenenfalls zur Segelfertigung ein natürliches Material genutzt werden, wenn hier auf ein synthetisches Produkt verzichtet werden soll.

Die Nutzung von Holz als mengenmäßig größter Anteil am Boot macht hier die Betrachtung der Wassernutzung und -verschmutzung sinnvoll, da im Laufe der Herstellung von Holzplanken Wasser genutzt wird und ein Wald ebenfalls Wasser bindet und verbraucht. Dies geschieht durch eine Interzeption des Niederschlags, welches in den Baumkronen direkt evaporiert und der Transpiration. Dies beschreibt den Transport des Grundwassers in die Baumkronen, wo dieses ebenfalls verdunstet. Ein Buchenwald kann so im Sommer

bis zu 60.000 l pro Hektar Verdunsten. Wälder haben daher im Vergleich mit anderen Vegetationsformen den höchsten Wasserverbrauch. Allerdings binden Wälder auch Grundwasser und sorgen für eine Neubildung. Hier gibt es zwischen den einzelnen Waldarten allerdings erhebliche Unterschiede. So bindet beispielsweise ein Kiefernwald im Laufe eines Lebens von 120 Jahren pro Hektar etwa 80.000 m³ Grundwasser. Ein Buchenwald hingegen mehr als das doppelte. [MJ11-ol]

Als Grundlage des Wasserfußabdrucks dient die DIN EN ISO 14046, welche die Grundsätze, Anforderungen und Leitlinien an einen Wasserfußabdruck angibt. Ein Wasserfußabdruck nach dieser Methode beruht dabei auf einer LCA nach der ISO-Norm 14044. Zum Wasserfußabdruck werden dabei die Emissionen in die Luft und den Boden gezählt, welche eine unmittelbare Auswirkung auf die Wasserqualität aufweisen. Das Vorgehen ist dabei analog zur Norm 14044, nur dass hier eine Sachbilanz für den Wasserfußabdruck aufgestellt wird, welche im Anschluss durch eine Wirkabschätzung ausgewertet wird. Dies kann dabei für sich allein geschehen oder im Rahmen einer Ökobilanz mit weiteren Faktoren erfolgen. [DIN23-ol]

Zu berücksichtigen sind in dieser Studie verschiedenen Aspekte. Unter anderem die genutzte Wassermenge und die Art der Wasserressource, welcher diese entnommen wurde. Außerdem muss eine Beschreibung der Wasserqualität erfolgen, sowohl bei der Entnahme als auch bei der Abgabe. Des Weiteren muss angegeben werden, wie dieses Wasser entnommen wurde und ob sich im Laufe des Jahres an eine Änderung der Wasserflüsse ergibt, sowie ein zeitlicher Aspekt der Wassernutzung. Die Evaluierung der erhobenen Daten erfolgt wieder analog zur ISO 14044. [DIN23-ol]

Das Konzept des Wasserfußabdrucks innerhalb einer Ökobilanz ist in Abbildung 2-10 veranschaulicht.

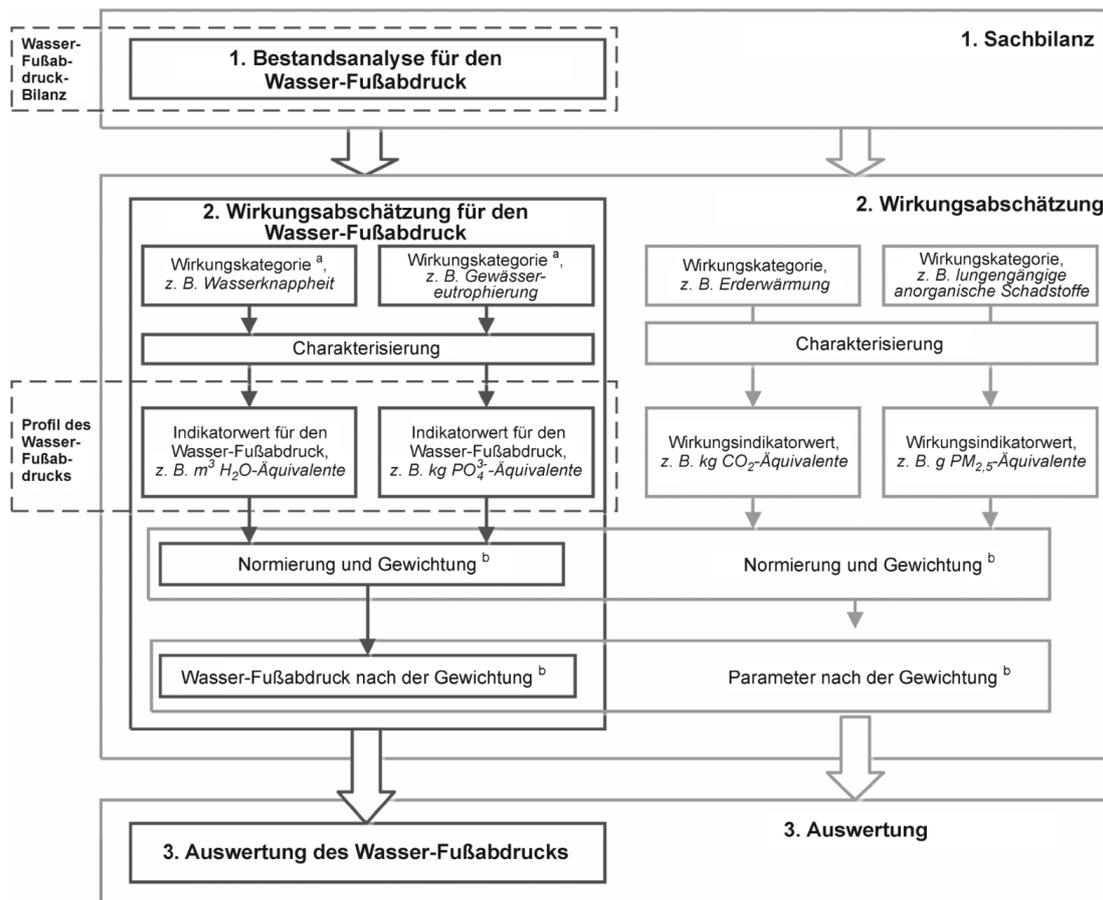


Abbildung 2-10: Konzept des Wasserfußabdrucks [DIN23-01]

Diese Faktoren sollen mithilfe der Kennzahl des Wasserfußabdrucks ermittelt werden.

2.6.4 Landnutzung

Im CBF setzte sich die Landnutzung zusammen aus dem aktuell belegten Land und der Transformation des Landes über ein Jahr. Für das sail.Ing Projekt zeigt sich die Landnutzung ebenfalls als interessante Kennzahl. Anders als im CBF bezieht sich diese Kennzahl hier nicht auf die Gebäudeflächen des Unternehmens, sondern auf die landwirtschaftliche Nutzfläche, aufgrund der Nutzung von natürlichen und biologischen Materialien Diese müssen angebaut werden, was Landfläche bedeutet oder im Falle von Tierischen Produkten Fläche für Weiden und Gehege. Da für dieses Projekt allerdings keine tierischen Produkte genutzt werden, soll hierauf nicht weiter eingegangen werden.

Für die Produktion von Holz ist die Landnutzung allerdings von Bedeutung. So hat die Gesamte Waldfläche Deutschlands beispielsweise einen Ausstoß an CO_2 Äquivalenten von 30 Megatonnen. Dem entgegen steht eine CO_2 Bindung von 100 Megatonnen, was verrechnet mit dem Ausstoß zu einer Einsparung von etwa 70 Megatonnen CO_2 führt. [Sta23-01]

2.6.5 Recycling

Da im Projekt eine Nutzung von 75% recycelten oder recyclebaren Materialien gefordert ist, wird der Anteil des Recyclings mitaufgenommen. Recycling bedeutet dabei, die stoffliche Rückführung von Abfällen in den Wirtschaftskreislauf. Hier kann unterschieden werden in eine Komponentenverwertung und ein Materialrecycling. [MG16, S. 2 f.]

Das Komponentenrecycling ist dabei entweder eine Wiederverwertung von Bauteilen für den gleichen einsatzweck oder eine Weiterverwendung in einem anderen Verwendungszweck. So könnte der Mast des Bootes beispielsweise mit einem anderen Boot weiterverwendet werden. Ist eine Weiterverwertung nicht möglich muss ein Materialrecycling stattfinden [MG16, S. 2 f.].

Diese Kennzahl soll hier der Quotient der Recycelten Masse an der Gesamtmasse des Bootes darstellen, welche in Prozent angegeben wird. Eine Besonderheit stellt dabei laut Reglement Aluminium dar, welches entweder als recycelt oder recyclebar anzusehen ist [the23-ol].

Gleichung 2-1

$$\text{Recyclebarkeit} = \frac{\text{Masse Recycletes} + \text{Recyclebares Material}}{\text{Gesamtmasse}} \cdot 100 \%$$

2.7 Datenbanken

Als letztes soll in diesem Kapitel noch auf die verschiedenen zur Verfügung stehenden Datenbanken eingegangen werden. Hier stellt open LCA eine große Anzahl von Datenbanken verschiedener Organisationen im open LCA-Nexus zur Verfügung. Diese Datenbanken lassen sich einfach und direkt importieren. Hierbei wird unterschieden zwischen freien Datenbanken und kostenpflichtigen Datenbanken.

Genutzt wurden für die Ökobilanz die Datenbanken Product Environmental Footprint (PEF), European reference Life Cycle Database of the Joint Research Center (ELCD) und openLCA LCIA methods. Diese Datenbanken konnten die meisten der benötigten Materialien abdecken. Nicht vorhandene Daten mussten für dieses Projekt geschätzt oder anderweitig beschafft werden. Da diese Daten allerdings auch nicht in den zahlungspflichtigen Datenbanken enthalten waren und es sich nur um einen geringen Anteil an nicht vorhandenen Materialien und Prozessen handelte, wurde entschieden nur die frei zugänglichen Datenbanken zu nutzen, da hier der Kosten-Nutzen-Faktor höher war. [Gre23a-ol]

Die Datenbank PEF ist dabei eine von der Europäische Kommission erstellte Datenbank mit dem Ziel die Ökobilanzierung in Europa zu vereinheitlichen. Die ELCD-Datenbank ist ebenfalls eine von der Europäischen Kommission erstellte Datenbank. Diese umfasst vor allem Elementarflüsse. Die PEF-Datenbank hingegen enthält vor allem Prozesse und Produkte. Die letzte genutzte Datenbank, openLCA LCIA Methods enthält LCIA-Methoden. Hier ist besonders die Methode des Greenhouse Gas Protokolls von Interesse, da

diese genutzt wird, um die Ökobilanz zu berechnen. Ebenfalls in dieser Datenbank enthalten ist eine Methode zur Bestimmung des Wasserfußabdrucks. [Gre23a-ol]

3 Modellbildung mit open LCA

In diesem Abschnitt erfolgt die Erstellung des Modells zur Berechnung der Kennzahlen mithilfe von open LCA.

3.1 Rahmen der Ökobilanz

Als erster Schritt der Ökobilanz muss, wie zuvor bereits erläutert, der Untersuchungsrahmen festgelegt werden.

Für die Regatta ist vorgeschrieben, dass eine LCA für das fertige Boot zu erstellen ist, welche auch nur dieses Boot betrachtet. So wird, wie bereits zuvor erwähnt, die App zur Navigation nicht mitbetrachtet, obwohl hier durch Serverinfrastrukturen ebenfalls mit dem Ausstoß von Emissionen zu rechnen ist. Das Boot und dessen Endmontage stellt nun die Systemgrenze der LCA dar. Als Untergruppen des Systems sind die einzelnen Baugruppen anzusehen. Bilanziert werden soll in dieser Bilanz bis hin zum Scope 3.

Die Zielgruppe dieser Bilanz ist das technische Komitee, welches das Boot zu Beginn der Regatta abnimmt. Die zuvor definierten Kennzahlen CO₂, Wasserfußabdruck, Energieverbrauch, Landnutzung und Recycling sind die zu ermittelnde Zielgrößen.

Aufgrund der nicht vollständigen Datenlage kann keine genaue Ökobilanz erstellt werden. Hier müssen die fehlenden Daten, sobald die Baugruppen mit der Konzeption und Planung abgeschlossen haben, ergänzt werden. Diese Ökobilanz wird dennoch vollständig anhand von anderen Quellen und Schätzungen erstellt, ist hier aber im Anspruch auf Vollständigkeit und Genauigkeit limitiert.

3.2 Sachbilanz

Die Sachbilanz besteht nun aus den Einzelteilen des Bootes. Dabei besteht jede Baugruppe wieder aus einer Vielzahl von einzelnen Elementen.

Da die einzelnen Baugruppen nur teilweise ihren Prozess der Konstruktion abgeschlossen haben, existiert keine vollständige Stückliste des Boots. Die erforderlichen Daten müssen, wie bereits erwähnt aus beispielhaften Modellen entnommen werden.

Für die Sensorikbaugruppe und das Ruder existieren allerdings Stücklisten, mit Hilfe derer sich die Sachbilanzen und Daten zu diesen Baugruppe erheben lassen.

Die einzelnen Sachbilanzen der Baugruppen und deren Einbindung in das open LCA-Modell sind im Folgenden genauer erläutert.

3.2.1 Sensorik

Als erstes soll auf die Sachbilanz der Sensorik eingegangen werden, da diese am überschaubarsten ist.

Die Baugruppe der Sensorik besteht nur aus einem Verklicker und einer Navigationsapp. Da die App allerdings nicht mit einbezogen wird, geht in diese Sachbilanz nur der Verklicker mit ein.

Da in keiner Datenbank ein Verklicker als Produkt oder die Herstellung eines solchen hinterlegt ist, muss für dieses Produkt eine Schätzung erstellt werden. Dazu dient ein einfacher Verklicker, welcher für Boote mit einer von Länge 3 m bis 6 m geeignet ist. Das ausgewählte Modell hat dabei eine Länge von 250 mm und eine Höhe von 240 mm, mit einem Gewicht von 34 g. Es besteht aus einem Kunststoffspritzguss, welcher durch ein Saphir Kugellager auf einer Aluminiumstange befestigt ist. Der Preis für dieses Produkt beträgt 29,99 €. [Win23-ol; Win23-ol; TOP23-ol]

Mithilfe dieser Parameter lässt sich nun in open LCA dieses Produktsystem und der Fertigungsprozess nachbilden. Abbildung 3-1 zeigt den in open LCA gebildeten Prozess.



Abbildung 3-1: Verklicker open LCA-Prozess

Wie Abbildung 3-1 zeigt, hat das Produkt des Verklickers als Input Größen eine Aluminiumextrusion, und einen Kunststoffanteil. Aufgrund des geringen Gewichtes des Verklickers und des damit verbundenen geringen Gewichtes des Kugellagers, wurde diese nicht mitbetrachtet.

Die Aluminiumextrusion hat eine Dicke von 5/16“ was etwa 7,93 mm entspricht. Bei einer angenommenen maximalen Länge des Aluminiums von $l = 270 \text{ mm}$ und einem Durchmesser von etwa $d = 8 \text{ mm}$ mit einer Dichte von $p = 2,71 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ergibt sich somit ein geschätztes Gesamtgewicht von etwa

Gleichung 3-1

$$13,57 \text{ cm}^3 \cdot 2,71 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 36,77 \text{ g}$$

Da dies das Gesamtgewicht bereits übersteigt, wird die Aluminiumstange in der Realität kürzer sein. Hier wurde eine Gesamtlänge von 200 mm angenommen. Dies ergibt ein Gewicht von ca. 27 g. [Win23-ol; Mar08, S. 17]

Als Spritzgusskunststoff wurde ABS angenommen. ABS hat eine Dichte von etwa $1,04 \text{ g/cm}^3$ was weniger als die Hälfte der Dichte von Aluminium entspricht. Daher wurde der Gewichtsanteil des Kunststoffes auf etwa 1/3 des Gesamtgewichtes geschätzt. Dies entspricht etwa 10 g. [Dom05, S. 250; KER23-ol]

Zusammen mit dem Aluminium ergibt dies ein Gesamtgewicht von 37 g. Dies ist immer noch 3 g mehr als das eigentliche Produkt, stellt für diese Baugruppe aber eine hinreichend genaue Abschätzung dar.

3.2.2 Ruder

Als nächstes wird auf die Sachbilanz des Ruders eingegangen. Hierfür wurden von der Baugruppe eine Stückliste sowie eine Prozessbeschreibung geliefert. Dadurch lässt sich diese Sachbilanz deutlich einfacher erstellen und es sind weniger Schätzungen nötig.

Das Ruder besteht dabei aus 58 verschiedenen Teilen. Diese Einzelteile bestehen dabei teilweise aus Standardbauteilen und teilweise aus Eigenanfertigungen. Zusätzlich kommt noch das Material zur Laminierung hinzu. In diesem Fall also CFK-Gewebe, Epoxidharz sowie Flachsfasern.

Da auch hier nicht alle Einzelteile in Datenbanken hinterlegt sind und um den Input im LCA-Modell zu vereinfachen, wurden die Einzelteile zu übergeordneten Gruppen zusammengefasst. Die Gruppen wurden dabei anhand der verwendeten Materialien erstellt. Die verwendeten Materialien und Gruppen sind in Tabelle 3-1 gezeigt.

Tabelle 3-1: Materialgruppen Ruder

<i>Materialgruppe</i>	<i>Gewicht [kg]</i>
<i>Aluminium</i>	0,594
<i>Stahl</i>	0,95
<i>Kunststoffe</i>	1,4
<i>Holz</i>	1
<i>CFK</i>	0,5
<i>Epoxidharz</i>	1
<i>Gesamtgewicht</i>	5,45

Diese Übergruppen wurden anschließend gewichtsmäßig in open LCA aufgenommen. Für die in Eigenfertigung hergestellten Teile aus Aluminium wurde noch ein durchschnittlicher Energieverbrauch für eine CNC-Fräse herangezogen. Da es sich bei den hergestellten Teilen um einfache Geometrien handelt, wurde ein Arbeitstag mit 8 Stunden zur Herstellung angenommen. Dies erscheint bei einer Anzahl von 22 Teilen als realistisch, da bei einer Vielzahl dieser nur einfache Bohr- und Drehprozesse nötig sind. Um den Energieverbrauch zu schätzen, wurde ein Datron M8 Cube mit einer 3 kW Frässpindel herangezogen. Dieser hat einen Energieverbrauch von 2,7 kWh. Bei einem Arbeitstag von 8 Stunden ergibt sich somit ein Energieverbrauch von 21,6 kWh. [DAT23-01]

Der so erstellte Gesamtprozess ist in Abbildung 3-2 gezeigt.

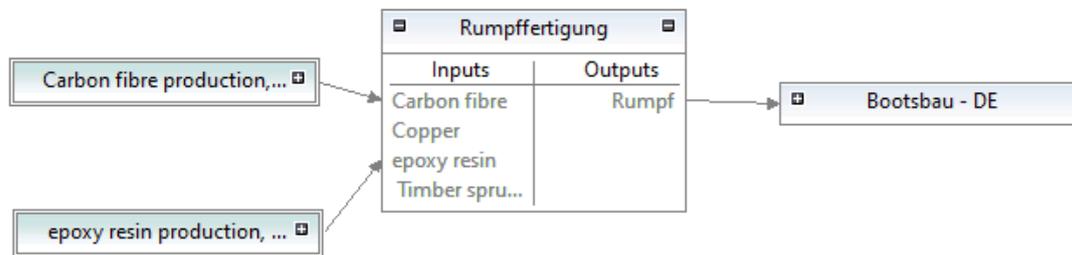


Abbildung 3-2: Ruderfertigung open LCA-Prozess

3.2.3 Rumpf und Schwert

Wie bereits in Kapitel 2.2.2.1 beschrieben, wird angenommen, dass der Rumpf aus Holz Klinkern besteht. Zusammengefügt werden diese Planken dabei mithilfe von Kupfernieten bzw. Schrauben. Hierfür sollen heimische Hölzer herangezogen werden, um unnötige Transportwege zu vermeiden und damit die Umweltbelastung zu minimieren. Außerdem handelt es sich bei Holz um einen natürlichen Rohstoff laut Reglement. Da für das Boot ein hoher Anteil an natürlichen und biologischen Materialien gefordert wird, ist die erste und einfachste Wahl Holz. Ein geeignetes heimisches Holz ist Fichte [Rec06-ol]. Dieses soll zur Rumpf- und Schwertfertigung genutzt werden. Um die einzelnen Planken abzudichten, sollen Flachfasern, sowie CFK-Roving und Epoxidharz genutzt werden [RVS+23].

Ein typischer International 14 hat wie bereits erwähnt ein Rumpfgewicht von etwa 70 kg. Dies bildet nun auch die Grundlage für den geschätzten Rumpf. Es wird angenommen, dass hiervon etwa 1 kg auf Kupfernieten oder Kupfernägeln entfällt. Dies ist eine typische Gebinde Größe und enthält je nach Größe zwischen 88 bis 1000 Nägel, was für ein Boot von 4,2 m als ausreichend angenommen wird. Des Weiteren soll nicht mehr als 1 kg CFK-Roving oder 1 kg Flachfasern sowie 1 kg Epoxidharz angenommen werden. Hieraus ergibt sich für den Holzanteil des Rumpfes ein Gewicht von geschätzten 66 kg. [Deu15-ol; Deu16-ol; TOP23-ol]

Das Steckschwert soll ebenfalls aus Holz gefertigt werden. Geschätzt soll es dabei etwa einen Meter Länge unter dem Rumpf aufweisen, mit einer Breite von 30 cm und einer Dicke von 2 cm. Da das Schwert im Schwertkasten eingesteckt werden muss, wird eine zusätzliche Verlängerung von 0,5 m angenommen. Das Schwert kommt somit auf eine Gesamtlänge von geschätzten 1,5 m. Mit einem Gewicht für Fichtenholz von 470 kg/m³ kommt das Schwert mit einem geschätzten Volumen von 0,009 m³ auf 4,23 kg [Hol23-ol]. Die Werte zur Schätzung des Schwertes wurden anhand einer ähnlichen Bootsklasse ermittelt. Die zur Hilfe genommene Bootsklasse war die ILCA 4, früher bekannt als Laser.

Der gebildete Prozess für den Rumpf ist in Abbildung 3-3 gezeigt, der Prozess für das Schwert in Abbildung 3-4.

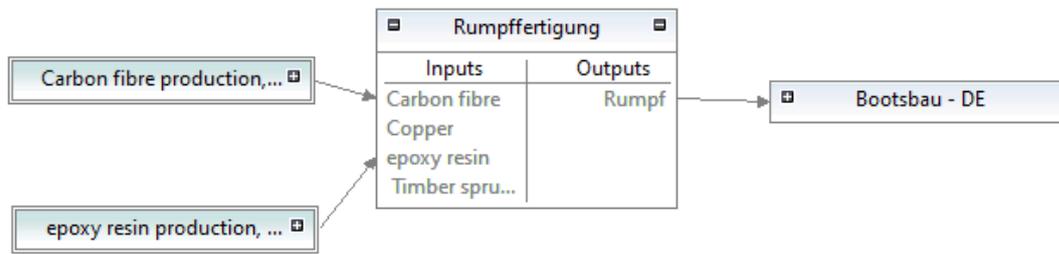


Abbildung 3-3: Rumpffertigung open LCA-Prozess

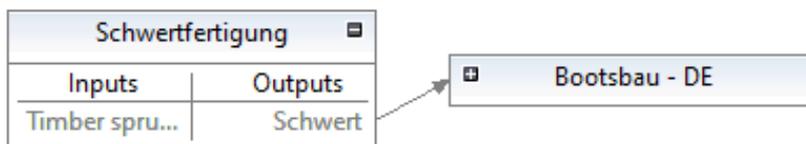


Abbildung 3-4: Schwertfertigung open LCA-Prozess

3.2.4 Restliche Zukaufteile und Endmontage

Die letzten Teile, welche für den Bau des Bootes benötigt, werden sind der Mast, der Baum, das Segel sowie einige Kleinteile wie Seile und Festmacher für ebendiese.

Da es auch für diese Teile keine in Datenbanken hinterlegten Werte und Prozesse gibt müssen auch hier Vereinfachungen angenommen werden. So wird für den Mast eine entsprechende Aluminiumextrusion gewählt. Da der Mast eine Länge von 7,6 m besitzen soll und dieser aus Aluminium besteht, handelt es sich hierbei um eine geeignete Annahme, welche sich einfach implementieren lässt. Ein Mast dieser Länge hat ein Gewicht von etwa 4,5 kg/m [Nau23-ol]. Der Mast hat also ein geschätztes Gewicht von etwa 34 kg. Dieses Gewicht wurde genutzt und durch eine Aluminiumextrusion im LCA-Modell abgebildet.

Der Baum des Bootes besteht ebenfalls aus Aluminium. Da die Länge des Baumes unbekannt ist, muss die Länge ebenfalls geschätzt werden. Da sehr sportlich und auch im Trapez gesegelt wird, wird angenommen, dass der Baum in einer Höhe von etwa einem Meter am Mast befestigt ist. Die Höhe des Segels ist somit auf 6,6 m beschränkt. Mit einem Dreieckigen Segel und einer Segelfläche von 18 m² lässt sich somit die Baumlänge schätzen. Dazu wird die Formel für den Flächeninhalt eines Dreiecks genutzt.

Diese lautet:

Gleichung 3-2

$$A = \frac{1}{2} \cdot g \cdot h$$

A: Flächeninhalt
g: Grundseite
h: Höhe

Werden nun die entsprechenden Werte eingesetzt,

$$18 \text{ m}^2 = \frac{1}{2} \cdot g \cdot 6,6 \text{ m}$$

Und nach der Grundseite g aufgelöst ergibt sich für g

$$g = \frac{18 \text{ m}^2 \cdot 2}{1 \cdot 6,6 \text{ m}} = 5,45 \text{ m}$$

Der Baum hat somit eine geschätzte Länge von 5,45m. Mit einem Gewicht von 4,5 kg/m ergibt sich für eine Aluminiumextrusion, als Näherung für den Baum ein Gewicht von 24,5 kg.

Zur Befestigung des Gennaker wird ein ausfahrbareres Bugsprit verwendet. Dieses besteht ebenfalls aus Aluminium. Ein Boot der Klasse International 14 hat wie erwähnt üblicherweise eine LWL von 4,267 m was 14 ft entspricht. Mit Bugsprit kommt ein solches Boot auf 7,010 m, was der Länge über Alles, kurz LüA, entspricht. Das Bugsprit hat somit eine Länge von 2,7 m. Bei einem Gewicht von 4,5 kg/m kommt das Bugsprit also auf 12,15 kg.

Zusammengefasst haben der Mast, der Baum und das Bugsprit somit ein Gewicht von 70,65 kg. Dies wird im LCA-Model als eine Aluminiumextrusion zusammengefasst, um eine bessere Übersicht im Model zu erhalten.

Als Material für das Segel wird Polyester angenommen. Hierbei handelt es sich um ein gängiges Material für Segel, welches bis zum Beginn der 80er Jahre noch das ausschließliche Material der Wahl darstellte [Deu08]. Mit einer Segelfläche von ca. 19 m² und einem Flächengewicht des Polyesters von 170 g/m² ergibt sich für das Segel, inklusive Vorsegel, ein Gesamtgewicht von 3.230 g, also knapp 3,2 kg. Dies wurde so als Polyestergerewebe in open LCA übernommen. [Dom05, S. 1018 ff.]

Für den Gennaker ist Polyamid Faser die gängigste Faser. Diese ist auch unter dem Markennamen Nylon bekannt. Für einen International 14 ist die gängige Segelfläche bis 40 m². Für dieses Modell soll deshalb die maximal typische Segelfläche angenommen werden.

Nylon besitzt dabei ein Flächengewicht von 64-112 g/m². Hier wird ebenfalls das maximale Gewicht angenommen. Hieraus ergibt sich für den Gennaker ein Gewicht von 4.480 g also etwa 4,5 kg. [Dom05, S. 1236 ff.]

Als letzter Punkt, welcher in die sonstigen Bauteile aufgenommen werden soll, sind Seile und Taue. Hier wird ebenfalls ein Material aus Polyester angenommen. Bei einem Boot mit Mastlänge von 13 m werden etwa 15 m tau benötigt. Das in diesem Projekt gefertigte Boot hat eine Masthöhe von 7 m, also knapp die Hälfte. Daher wird eine Benötigte Tau Länge von 7,5 m angenommen. Mit einem Durchmesser von 10 mm kommt ein Tau auf ein Gewicht von 69 g/m. Für ein 7,5 m Tau ergibt sich damit ein Gewicht von 517,5 g. [Kan23-ol]

Der Input im Fertigungsprozess des Bootes mit allen Baugruppen ist in Abbildung 3-5 noch einmal als open LCA-Graph aufgezeigt.

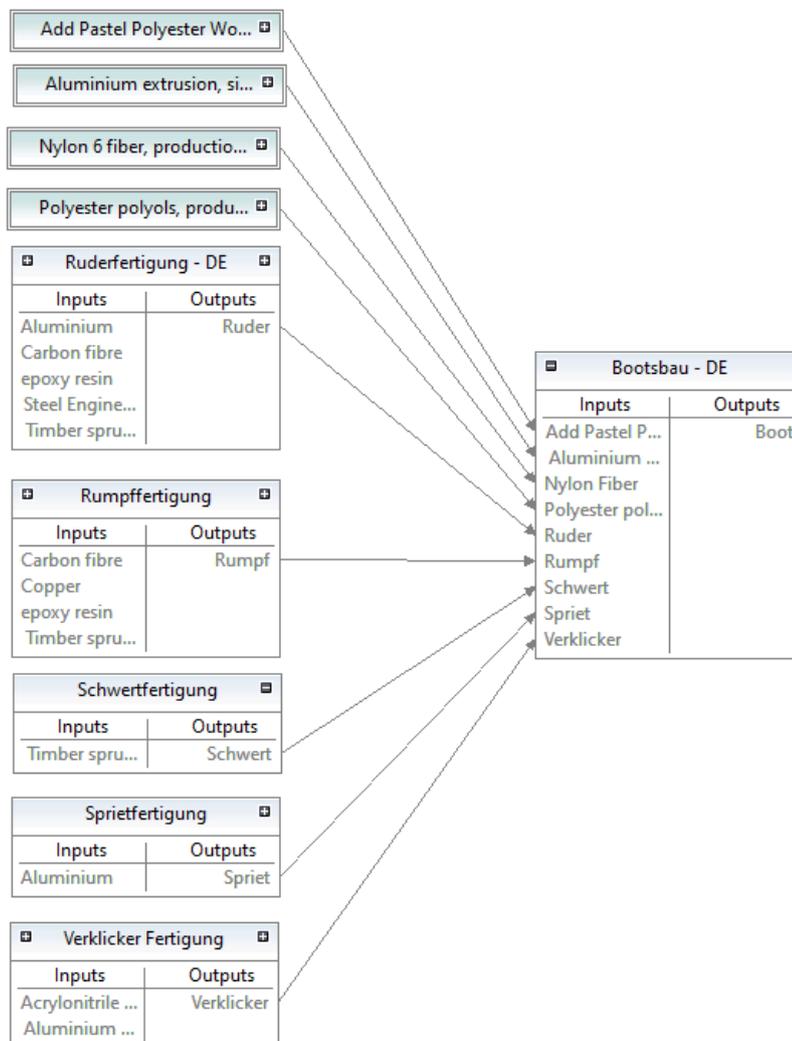


Abbildung 3-5: Gesamtprozess Bootsbau

3.3 Wirkabschätzung

Um die Wirkabschätzung zu erstellen, wurden die aus den Datenbanken entnommenen und in das Modell übertragenen Werte, mithilfe von open LCA-Berechnungen angestellt. Um nun einen Betrag an CO₂ Äquivalenten zu erzielen, wurde mithilfe der GHG Protocol Methode gerechnet. Diese wurde mithilfe der open LCA LCIA Datenbank zum Modell hinzugefügt. Das Zielgewicht der Berechnungen lag dabei auf dem Gesamtgewicht des Bootes. Dies liegt bei 158,6 kg. Es wurde dazu von open LCA die gesamte Prozesskette gebildet.

Um nun den Wasserfußabdruck bestimmen zu können wurde die AWARE Methode genutzt. AWARE steht dabei für **A**vailable **W**ater **R**emaining. Diese Methode bestimmt wie viel Wasser entnommen wurde und wie viel am Ende, nach einer Rückführung im Ökosystem verbleibt. Hierin eingeschlossen ist der Verbrauch des Wassers durch Verschmutzung. [WUL23-01]

Um die Kennzahl des Recyclings zu berechnen, wurden die einzelnen Bauteile und Baugruppen hinsichtlich ihrer Kategorien nach Reglement zugeordnet. Die Gewichte dieser wurden anschließend aufsummiert und mithilfe der Formel Gleichung 2-1 der Anteil an Recyclen Material berechnet.

Der Energieverbrauch wurde ebenfalls aus den eingefügten Daten herausgezogen. Diese stellen den Scope 2 im GHG-Protokoll dar und sind ebenfalls gesondert angegeben.

Als letztes muss nun noch der Flächenverbrauch berechnet werden. Hierzu wurde für die benötigte Waldfläche, zur Erzeugung des nötigen Holzes, ein Standardwert für den Ertrag eines Fichtenwaldes genutzt. Anhand des benötigten Gewichtes an Holz für das Boot konnte nun die nötige Waldfläche bestimmt werden.

3.4 Auswertung

In diesem Abschnitt sollen nun die Ergebnisse, welche durch open LCA berechnet wurden, ausgewertet werden.

Die Berechnung der Ergebnisse mithilfe von open LCA zeigt nun auf, in welchen Bereichen die meisten Fossilen CO₂ Äquivalente ausgestoßen werden. Hier zeigt sich, dass die größten Emissionen im Bereich der Ruderfertigung auftreten. Die Gesamtergebnisse sind noch einmal in Abbildung 3-6 gezeigt.

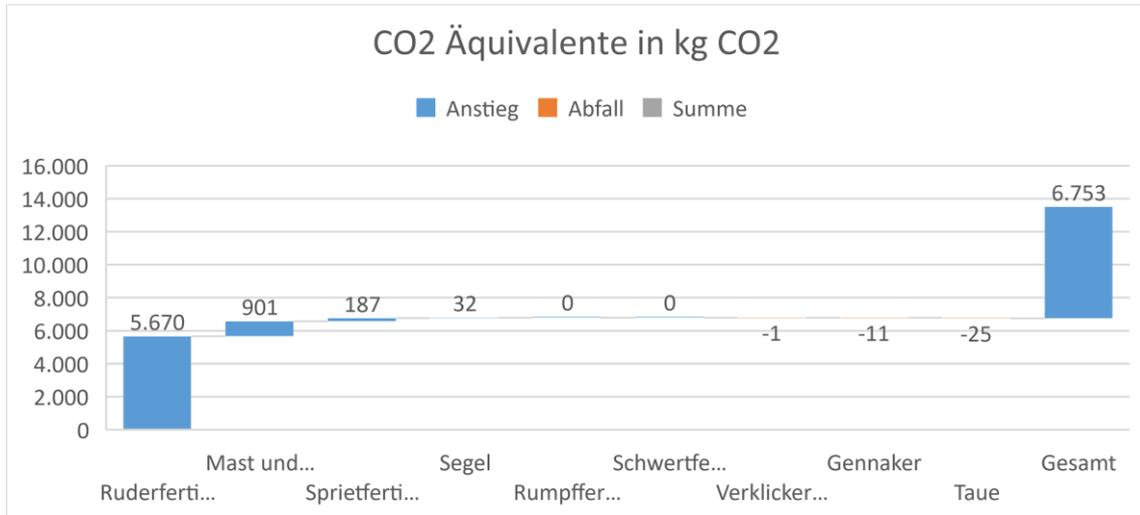


Abbildung 3-6: CO2 Äquivalente

Hier zeigt sich, dass in diesem Bereich noch Einsparungen möglich sind. Außerdem kann durch eine Verwendung von weniger Aluminium ebenfalls noch eingespart werden, da dies den zweitgrößten Anteil ausmacht. Wie ebenfalls zu erkennen ist, haben einige Baugruppen eine Einsparung an CO2 Äquivalente. Dies liegt daran, dass in diesen Prozessen in open LCA ein Recycling oder Wiederverwendung von Stoffen vorgesehen ist. Außerdem nutzen die erzeugten Materialien teilweise nachhaltige Stromerzeugungen wie beispielsweise Wasserkraft. Dies wirkt sich positiv auf die CO2 Äquivalente aus.

Eine weitere Bestimmte Kennzahl ist der Energieverbrauch im Scope 2. Hier zeigt sich, dass im gesamten Prozess geschätzt 21,6 kWh an Scope 2 Energie, in diesem Falle hauptsächlich Strom, verbraucht werden.

Im Bereich des Wasserfußabdruckes ergibt sich folgendes Bild.

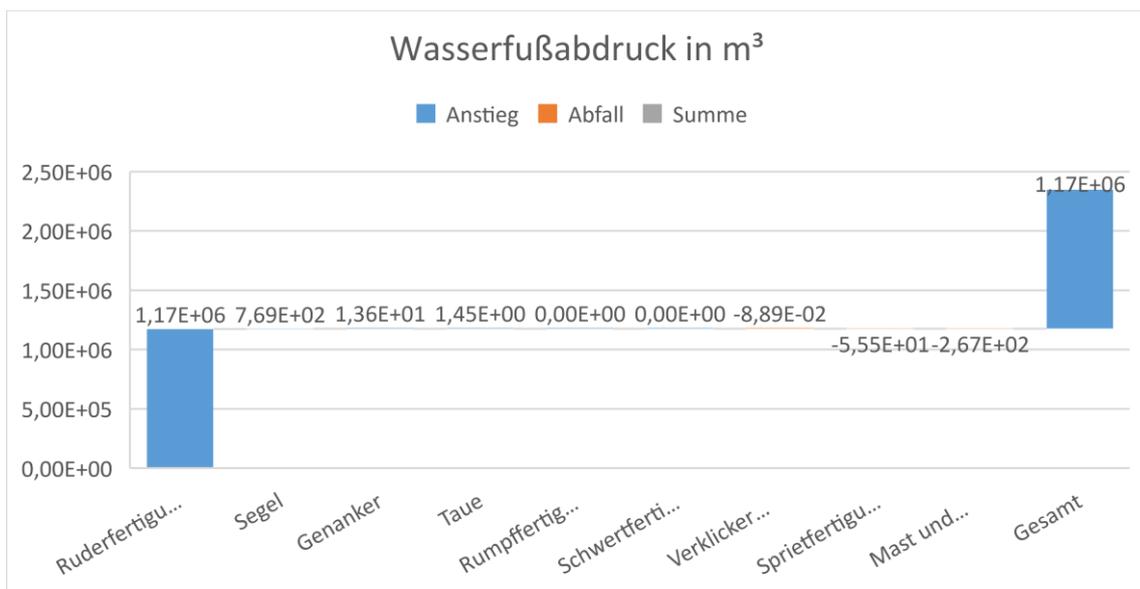


Abbildung 3-7: Wasserfußabdruck

Hier zeigt sich, dass ebenfalls im Bereich der Ruderfertigung der größte Wasserfußabdruck entsteht. Dieser liegt bei 1.173.780 m³.

Um die Landnutzung zu bestimmen, wurde ein Ertrag von ungefähr 10 m³ pro Fichte angenommen. Mit einem Gewicht von 470 kg/m³ liefert eine Fichte etwa 4.700 kg an Holz. Für das Boot wurden ca. 70 kg Fichtenholz benötigt. Dies ist zwar weniger als ein Baum liefert, dennoch wird eben ein Baum benötigt. Ein Fichtenwald hat etwa eine Dichte von 400 Bäumen pro Hektar. Es wird für einen Baum also 0,0025 ha benötigt, was 25 m² entspricht. [Hol23-ol; Gar22-ol; Sch23-ol]

Die letzte Kennzahl, welche ausgewertet werden soll, ist die Kennzahl des Recyclings. Mit einem Gesamtgewicht von 158,6 kg und einem Anteil von etwa 140 kg an Recycelten oder Recyclebaren und biologischen Stoffen ergibt sich ein Recyclingprozentsatz von gut 88 %. Dies liegt zum einen an dem hohen Gewichtsanteil des Aluminiums und zum anderen, an der Fertigung des Rumpfes aus Holz. So entfallen bereits 70 kg durch die Verwendung von Holz auf Rumpf und Schwert. Des Weiteren entfallen etwa 70,65 kg an Aluminium auf den Mast, Baum und Bugspriet. Allein diese Bauteile kommen also auf ein Gewicht von 140 kg was bereits 87,5 % des Gesamtgewichts entspricht. Die geforderten 75 % können auf diese Weise bereits erreicht werden.

Die Ergebnisse der einzelnen Kennzahlen sind noch einmal in Tabelle 3-2 abgebildet.

Tabelle 3-2: Ergebnisse für Kennzahlen

<i>Kennzahl</i>	<i>Betrag</i>
<i>CO2</i>	6.753 kg CO2 Äquivalente
<i>Energieverbrauch</i>	21,6 kWh
<i>Wasserfußabdruck</i>	1,2E+6 l
<i>Landnutzung</i>	25 m ²
<i>Recycling</i>	88 %

4 Prüfung der Ergebnisse

In diesem Abschnitt sollen die Ergebnisse überprüft und validiert werden.

Durch die unklare und unvollständige Datenlage zeigt sich ein verzerrtes Bild der Ergebnisse dieser Ökobilanz. So ist der größte Faktor der Emissionen die Ruderfertigung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass über diesen Prozess die meisten Informationen vorliegen und er somit am besten modelliert werden kann. Hier wird ein großer Teil der Emissionen durch Strom und die Erzeugung von Stahl sowie Kunststoff erzeugt. Die Kunststoff Emissionen können beispielweise durch die Verwendung von im Ozean gesammelten Kunststoff vermindert werden. [FDC20]

Im Vergleich dazu hat der Prozess der Rumpffertigung nach dieser Ökobilanz keinen Einfluss. Ein Wald ist zwar in der Lage CO₂ zu binden, jedoch wird im weiteren Verlauf der Herstellung vom Baum zur Holzplanke ebenfalls CO₂ ausgestoßen, weshalb hier ein Wert ungleich null zu erwarten wäre.

Des Weiteren ist ein Umweltweinfluss des CFK und Epoxidharzes nicht erkennbar. Dies ist eine nach aktueller Forschung nicht logische Aussage der Ökobilanz. So sollte hier ebenfalls CO₂ Äquivalente und Gewässerverschmutzungen auftreten. [CGS17]

Es zeigen sich nach dieser Ökobilanz klar Limitationen, die es zu beachten gilt. So ist eine genau Aussage über die Bilanzierung in diesem Projekt leider nicht möglich. Hierzu müssten die Daten um die noch fehlenden Angaben der Rumpfbaugrupp, sowie der sonstigen Zukaufteile noch ergänzt werden, um hier ein genaueres und vollständigeres Bild zu erhalten.

Eine mögliche weiter Ursache dieser Abweichungen von den Erwartungen liegt vermutlich in den verwendeten Datenbanken. Sollten in diesen nur unzureichende Werte hinterlegt sein, so ist es durchaus möglich, dass es zu Abweichungen kommen kann. Um dies zu bestätigen oder auszuschließen ist ein Vergleich mit anderen Datenbanken nötig. Dies soll aber kein Bestandteil dieser Arbeit sein.

5 Bewertung von open LCA

In dem folgenden Kapitel soll die Software open LCA im Hinblick auf die Nutzung zur Modellierung einer Ökobilanz innerhalb dieses Projektes bewertet werden.

Open LCA bietet eine einfache und intuitiv zu nutzende Oberfläche mit einer großen Anzahl an Möglichkeiten den gewünschten Prozess zu modellieren. Diese Prozesse können allerdings nur so gut wie ihre Datengrundlage und damit die zur Verfügung stehenden Datenbanken sein. Hier bietet open LCA eine breite Auswahl an Datenbanken, die jedoch stark in ihrer Qualität schwanken. Für dieses Projekt wurde sich auf die frei zugänglichen Datenbanken beschränkt. Im Vergleich hierzu sind die zahlungspflichtigen Datenbanken deutlich umfangreicher, was für dieses Projekt allerdings nicht nötig war, da alle benötigten Materialien und Prozesse auch in den frei verfügbaren Datenbanken enthalten waren. Eine Aussage über die Güte dieser, im Vergleich zu den zahlungspflichtigen Datenbanken, ist so nicht möglich.

Aufgrund der großen Menge an Einzelteilen und Prozessen ist eine gute Datengrundlage allerdings sehr wichtig, um effektiv eine Ökobilanz erstellen zu können. Hier lässt sich durch open LCA sehr einfach die komplexen Prozesse erstellen.

Die Berechnung der Emissionen ist dank open LCA ebenfalls sehr einfach durchzuführen, da auch hier eine Reihe an LCIA-Methoden zur Verfügung gestellt wird. Open LCA bietet auch hier die Möglichkeit eigenen Methoden zu implementieren.

Allerdings sei erwähnt, dass einige Datenbanken auf eigene Proprietäre Softwarelösungen setzten. Dies ist vor allem im Bereich der zahlungspflichtigen Datenbanken zu beobachten. Sollte sich dieser Trend fortsetzen verringert sich der Nutzen von open LCA, da die Datengrundlage somit schwindet und der Vorteil einer Open Source Software verloren geht.

6 Fazit

Der weitere Ausblick im Projekt sail.Ing sieht nun im nächsten Schritt die Fertigung des Rumpfes und des Endgültigen Bootes vor. Zum Zeitpunkt dieser Arbeit lag hierzu allerdings noch kein Konzept zum Rumpf vor. Dieses muss noch erstellt werden, damit an der Regatta teilgenommen werden kann. Diese findet im Sommer 2024 statt. Das Konzept dazu soll im Wintersemester 23/24 ausgearbeitet werden und im Anschluss daran soll das Endprodukt gebaut werden.

Wenn die Planung und Konzeption des Rumpfes und Schwertes sowie eine Stückliste der Zukaufteile erstellt worden ist, können diese in das erstellte open LCA-Modell eingefügt und ergänzt werden. Das erstellte Modell kann im Weiteren Verlauf des Projektes also als geeignetes Grundgerüst genutzt werden und durch weitere Anpassungen und Erweiterungen das letztlich gefertigte Boot abbilden. Diese Daten sind noch notwendig, um ein vollständigeres und genaueres Bild der für den Wettbewerb nötigen Ökobilanz zu liefern.

Zum jetzigen Zeitpunkt sind wie bereits zuvor erwähnt nur Aussagen über das Ruder und die Sensorik möglich. Die Aussagen der anderen Bauteile beruhen auf Schätzungen und Vergleichen mit anderen Booten dieser Größe. Dies ist nach Anforderung der Regatta allerdings nicht ausreichend und muss noch nachgebessert werden.

Durch die einfache Bedienung von open LCA und das Einbinden neuer Prozesse und Datenbanken ist eine Nachbesserung des bereits vorhandenen Modells allerdings leicht möglich.

7 Literaturverzeichnis

- [CDL+20-ol]: Ciroth, Andreas; Di Noi, Claudia; Lohse, Tim; Srocka, Michael: openLCA 1.10 Comprehensive User Manual, 2020unter: <https://www.openlca.org/learning/>, zuletzt abgerufen am: 01.11.2023
- [CGS17]: Cucinotta, Filippo; Guglielmino, Eugenio; Sfravara, Felice: Life cycle assessment in yacht industry: A case study of comparison between hand lay-up and vacuum infusion. In *Journal of Cleaner Production*, S. 3822–3833, 142. Jg. 2017
- [Clé23-ol]: Clément Molinier: Corporate Biodiversity Footprint. Methodological guide, 2023unter: https://www.icebergdatalab.com/documents/CBF_client_methodological_guide_March_23.pdf, zuletzt abgerufen am: 06.08.2023
- [DA12]: Dias, Ana; Arroja, Luís: Comparison of methodologies for estimating the carbon footprint – case study of office paper. In *Journal of Cleaner Production*, S. 30–35, 24. Jg. 2012
- [DAT23-ol]: DATRON High-Speed Frästechnologie: Effizient und Energiesparend, 2023unter: <https://www.datron.de/de/energieeffizient>, zuletzt abgerufen am: 02.11.2023
- [Deu15-ol]: Deutscher Boots- und Schiffbauer-Verband: Die Verwendung von Kupfernieten im Bootsbau, 2015unter: <https://www.dbsv.de/de/blog/die-verwendung-von-kupfernieten-im-bootsbau>, zuletzt abgerufen am: 02.11.2023
- [Deu16-ol]: Deutscher Boots- und Schiffbauer-Verband: Kupfernieten im Bootsbau (Teil 2), 2016unter: <https://www.dbsv.de/de/blog/kupfernieten-im-bootsbauteil-2>, zuletzt abgerufen am: 02.11.2023
- [Deu08] Deutscher Hochseesportverband Hansa: Seemannschaft. Handbuch für den Yachtsport, 2008, Delius Klasing
- [DIN19-ol]: NAGUS: DIN EN ISO 14064-1:2018. Treibhausgase - Teil 1: Spezifikation mit Anleitung zur quantitativen Bestimmung und Berichterstattung von Treibhausgasemissionen und Entzug von Treibhausgasen auf Organisationsebene (ISO 14064-1:2018); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14064-1:2018, 2019unter: <https://nautos.de/9ER/search/item-detail/DE30077783>, zuletzt abgerufen am: 02.11.2023
- [DIN21a-ol]: NAGUS: DIN EN ISO 14040-2021-02. Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020, 2021unter: <https://nautos.de/9ER/search/item-detail/DE30087057>, zuletzt abgerufen am: 05.07.2023
- [DIN21b-ol]: NAGUS: DIN EN ISO 14044-2021-02. Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020, 2021unter: <https://nautos.de/9ER/search/item-detail/DE30087058>

- [DIN23-ol]: DIN EN ISO 14046. Umweltmanagement - Wasser-Fußabdruck - Grundsätze, Anforderungen und Leitlinien (ISO 14046:2014); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14046:2016, 2016unter: <https://nautos.de/9ER/search/item-detail/DE30066210>, zuletzt abgerufen am: 23.10.2023
- [Dom05]: Dominghaus, Hans: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften, 2005, Springer Berlin Heidelberg
- [Eur23-ol]: GHG Protocol, 2023, zuletzt abgerufen am: 01.11.2023
- [FDC20]: Fang, Qi; Despeisse, Mélanie; Chen, Xiaoxia: Environmental Impact Assessment of Boatbuilding Process with Ocean Plastic. In Procedia CIRP, S. 274–279, 90. Jg. 2020
- [Gar22-ol]: Gartenjournal.net: Fichtenholz: Wie viel Festmeter stecken im Baum?, 2022unter: <https://www.gartenjournal.net/wieviel-festmeter-hat-eine-fichte>, zuletzt abgerufen am: 02.11.2023
- [GHW18]: Goldenstein, Jan; Hunoldt, Michael; Walgenbach, Peter: Wissenschaftliche(s) Arbeiten in den Wirtschaftswissenschaften. Themenfindung – Recherche – Konzeption – Methodik – Argumentation, 2018, Springer Gabler
- [Gre23a-ol]: GreenDelta GmbH 2023: openLCA Nexus: The source for LCA data sets, 2023unter: <https://nexus.openlca.org/database/>, zuletzt abgerufen am: 01.11.2023
- [Gre23-ol]: You, too, can master value chain emissions | GHG Protocol, 2023b, zuletzt abgerufen am: 02.11.2023
- [Hol23-ol]: Gewicht der Holzarten | Holzgroßhandel Holz Kahrs, 2023unter: <https://holz-kahrs.de/lexikon/gewicht-von-holz/>, zuletzt abgerufen am: 02.11.2023
- [Int23-ol]: Historie - International 14, 2020aunter: <https://www.international14.de/historie/>, zuletzt abgerufen am: 07.08.2023
- [Int23-ol]: International 14 - International 14, 2023bunter: <https://www.international14.de/international-14/>, zuletzt abgerufen am: 12.10.2023
- [Kan23-ol]: LIROS Dynamic plus, 2023unter: <https://www.kanirope.de/liros-dynamic-plus>, zuletzt abgerufen am: 01.11.2023
- [KER23-ol]: KERN GmbH: Datenblatt | KERN, 2023, zuletzt abgerufen am: 02.11.2023
- [Kor18]: Kornmeier, Martin: Wissenschaftlich schreiben leicht gemacht. Für Bachelor, Master und Dissertation, 2018, UTB; Haupt
- [Mar08]: Marschall, Luitgard: Aluminium. Metall der Moderne, 2008, Oekom Verlag
- [MG16]: Martens, Hans; Goldmann, Daniel: Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis, 2016, Springer Vieweg

- [MJ11-ol]: Müller, Jürgen: Wasser - das "blaue Gold" des Waldes, 2011unter: https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn048319.pdf, zuletzt abgerufen am: 02.11.2023
- [Nau23-ol]: AG+ SPARS CATALOG - AG+ SPARS - PDF Katalog | Beschreibung | Prospekt, 2023unter: <https://pdf.nauticexpo.de/pdf-en/ag-spars/ag-spars-catalog/27125-120998.html#open566535>, zuletzt abgerufen am: 02.11.2023
- [PTD+23]: Priehs, Lena; Tiessen, Lydia; Dröge, Lareen; Meyer, Frederik; Backmeister, Benjamin; Bitter, Theo; Hirsch, Robin; Möller, Philipp; Fuchs, Killian; Kuhfuß, Tim; Essiger, Bjarne; Neumann, Pascal; Wurms, Dimitri; Reimer, Sebastian; Rausch, Sascha; Kerber, Davin: Dokumentation SailIng_OWL, 2023
- [Rec06-ol]: Recht, Felix: Wie baut man Boote?, 2006unter: <https://www.proholz.at/zuschnitt/22/wie-baut-man-boote>, zuletzt abgerufen am: 02.11.2023
- [RVS+23]: Riegel, Adrian; Vogt, Michael; Siegert, Richard; Eibeck, Eric; Wolski, Natascha: Spezifikation des Projektes Sail.Ing OWL des VDI OWL, 2023
- [Sch23-ol]: Schätzhilfen: Wieviel Festmeter und Bäume stehen in meinem Wald?, 2023unter: https://www.lwk-niedersachsen.de/lwk/news/36164_Schaetzhilfen_Wieviel_Festmeter_und_Baeume_stehen_in_meinem_Wald, zuletzt abgerufen am: 02.11.2023
- [Sta23-ol]: Nettostromerzeugung - Anteil der Energieträger in Deutschland bis 2022 | Statista, 2023aunter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/75405/umfrage/stromerzeugung-in-deutschland-seit-2008/>, zuletzt abgerufen am: 20.10.2023
- [Sta23-ol]: Monatlicher Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung in Deutschland bis 2023 | Statista, 2023bunter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/779784/umfrage/monatlicher-anteil-erneuerbarer-energien-an-der-stromerzeugung-in-deutschland/>, zuletzt abgerufen am: 20.10.2023
- [Sta23-ol]: Treibhausgas-Bilanz der deutschen Waldfläche 2022 | Statista, 2023cunter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1274218/umfrage/treibhausgas-bilanz-wald-deutschland/>, zuletzt abgerufen am: 20.10.2023
- [the23-ol]: the Technical Committee: Class Rules 1001VELAcup® Regolamento di Classe 1001VELAcup® 2023-2024, 2023unter: <http://www.1001velacup.eu/regolamento.html>, zuletzt abgerufen am: 07.08.2023
- [TOP23-ol]: Rosenkopf-Bootsnägel / Nieten Kupfer, 2023aunter: <https://www.toplicht.de/de/farben-bootsbau/schrauben-naegel-nieten-propfen/nieten-niet-scheiben/2914/rosenkopf-bootsnaegel/nieten-kupfer>, zuletzt abgerufen am: 02.11.2023
- [TOP23-ol]: WINDEX Windrichtungsanzeiger, 2023bunter: <https://www.toplicht.de/de/rigg-segel/windanzeiger-verklicker/1016/windex-windrichtungsanzeiger?number=1088-010>, zuletzt abgerufen am: 13.10.2023

- [Umw23-ol]: Die Treibhausgase, 2023unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase>, zuletzt abgerufen am: 19.10.2023
- [VDI23-ol]: VDI: sail.Ing OWL auf Kurs 1,5 Grad, 2023unter: <https://www.vdi.de/ueber-uns/vor-ort/bezirksvereine/ostwestfalen-lippe-bezirksverein-ev/vdi-fokusthemen-in-owl/sailing-owl>, zuletzt abgerufen am: 12.10.2023
- [Ver98-ol]: Vereinte Nationen: Das Protokoll von Kyoto. zum Rahmenübereinkommen der Vereinten ationen über Klimaänderungen, 1998unter: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpger.pdf>, zuletzt abgerufen am: 23.10.2023
- [Win23-ol]: About - Windex Development, 2019aunter: <https://windexdevelopment.com/about/?lang=de>, zuletzt abgerufen am: 13.10.2023
- [Win23-ol]: Windex® 10 C | Boote von 10–20 Fuß (3–6 m) - Windex Development, 2021bunter: <https://windexdevelopment.com/de/shop/products-de/windex-10/>, zuletzt abgerufen am: 13.10.2023
- [WML13]: Weiß, Daniel; Müller, Roman; Lössl, Saskia: Umweltkennzahlen in der Praxis, 2013
- [WRK+23]: Wiese, Marcel; Rempel, Jonas; König, Ruven; Quiring, David; Sagir, Serap; Wunderlich, Lars: HSBI Abschlussbericht SailIng SS2023. Sail.Ing Sensor/Telemetriesysteme, 2023
- [WSS+17]: Wyrzens, Hans; Schauppenlehner-Kloyber, Elisabeth; Sieghardt, Monika; Gratzer, Georg: Wissenschaftliches Arbeiten. Eine Einführung, 2017, facultas
- [WUL23-ol]: What is AWARE (Available WAter REmaining)? - WULCA, 2021unter: <https://wulca-waterlca.org/aware/what-is-aware/>, zuletzt abgerufen am: 02.11.2023
- [WW04]: The greenhouse gas protocol. A corporate accounting and reporting standard, 2004, World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development
- [Zie23-ol]: Ziegelmayr Handelsgesellschaft mbH: RS500 Trapezjolle für sportliches aber preiswertes Segeln, 2023unter: <https://rssailing.de/segelboote/segeljollen/rs500/>, zuletzt abgerufen am: 07.08.2023

Anhang

A-1	Explosionszeichnung Ruder.....	A-1
-----	--------------------------------	-----

