



„Life Cycle Assessment meets Education for Sustainability“

Ein Projekt zur Entwicklung und Implementation von Lehr- und Lernmaterialien für ein
wichtiges Thema der Nachhaltigkeitsdebatte

Aktenzeichen der DBU: 34574

Schlussbericht

Förderzeitraum Februar 2019 – November 2022



Prof. Dr. I. Eilks, Dr. A. Siol
Universität Bremen
Institut für die Didaktik der Naturwissenschaften (IDN)
Leobener Straße 4, NW 2, 28359 Bremen

Projektbeginn	Februar 2019
Projektlaufzeit	36 Monate
Verlängerung	6 Monate

Bremen, im November 2022

INHALT

PROJEKTKENNBLATT	I-II
1. KURZFASSUNG DES BERICHTS	2
2. ANLASS UND ZIELSETZUNG DES PROJEKTS	3
2.1. Motivation	3
2.2. Kontext	5
3. DARSTELLUNG DER ARBEITSSCHRITTE UND DER ANGEWANDTEN METHODEN	6
3.1. LCA-Begrifflichkeiten und Komplexität	6
3.2. Definition der betrachteten Endpunkte	7
3.3. Bewertungstools und Datenbanken	18
3.4. Konzeption der Vorhabeninhalte für Schule, Universität und Ausbildung	23
3.4.1. Anwendungsbeispiele zielgruppengerecht aufbereitet	
3.4.2. Harmonisierung des Materials und didaktische Reduktion	24
3.4.3. Implementierung der Materialien in Schulen	26
3.5. Exposees der LCA-Anwendungsbeispiele	28
3.6. Digitale Aufbereitung und Entwicklung eines Webauftritts	36
4. ERGEBNISSE UND ÖFFENTLICHKEITSARBEIT	38
4.1. Verwertungsplan und Öffentlichkeitsarbeit	38
4.2. Zur Situation an der Universität und den Schulen Bremens in Corona-Zeiten	38
4.3. Qualifizierungsarbeiten	39
4.4. Lehrerfortbildungen	41
4.5. Veranstaltungen in Schulen und Schülerlabor	41
4.6. Publikationen	43
4.7. Abgleich zu den erwarteten Erträgen	43
5. ZEITPLAN	44
6. FAZIT	45
7. LITERATUR	46

06/02

**Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

Az **34574/01**Referat **41**

Fördersumme

122.922,- €**Antragstitel**

**„LCA & Co. –
Nachhaltigkeitsbewertungsmethoden für Nachhaltigkeitsbildung in
Schule, Fachkräfteausbildung und Studium zugänglich machen“**

Stichworte

Bildung für nachhaltige Entwicklung. Chemiedidaktik, Lernplattform, Prezi, Fortbildung, Berufsausbildung, naturwissenschaftliche Berufe, Studium, der Agrartechnik, Biologie, Chemie, Ingenieurwesen
Life Cycle Assessment (LCA), Bewertungsmethoden, Virtual Water, Wassergebrauch, Flächenverbrauch, Energiebedarf, CO₂-Footprint, Umweltbelastungspunkte UBP's

Laufzeit

36+6 Monate

Projektbeginn

16.02.2019

Projektende

15.08.2022

Projektphase(n)

3

Schlussbericht

Nov. 2022

Bewilligungsempfänger

Universität Bremen
Institut für die Didaktik der
Naturwissenschaften IDN
Prof. Dr. I. Eilks
Leobener Str. 5, NW2
28334 Bremen

Tel 0421 218 63280

Fax 0421 218 63288

Projektleitung:

Prof. Dr. I. Eilks

Bearbeiter: Prof. Dr. I.

Eilks, Dr. A. Siol,

Kooperationspartner

Prof. Dr. Dr. Vania Gomez Zuin,
Universidade Federal de Sao Carlos, Brasil
Prof. Dr. Ozcan Gulacar
University of California, Davis, USA

Deutsche Bundesstiftung Umwelt ☐ An der Bornau 2 ☐ 49090 Osnabrück ☐ Tel 0541/9633-0

☐ Fax 0541/9633-190 ☐ <http://www.dbu.de>

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

In diesem Vorhaben wurden Lern-Lehr-Angebote zur Erstellung von Studien zum Life Cycle Assessment entwickelt und über eine Lernplattform bereitgestellt. Die Angebote richten sich sowohl an Lerngruppen der Jahrgänge 9-13 als auch an Auszubildende der naturwissenschaftlich technischen Lehrberufe, Studierende der naturwissenschaftlichen Fachrichtungen, Agrarwissenschaftler, Ingenieure, Lehrkräfte in Ausbildung, Lehrkräften der beruflichen und allgemeinbildenden Schulen sowie an eine interessierte Öffentlichkeit. Ziel sollte es sein, mit Hilfe geeigneter Produktbeispiele die zum Teil recht komplexe Erstellung von Lebenszyklusanalysen einer didaktischen Reduktion zu unterwerfen, dass Lernende wie auch Lehrende die notwendigen Verfahrensschritte nachvollziehen und zielgerichtet anwenden können.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im Zusammenspiel von Fachwissenschaften und Fachdidaktik, Schülerlabor, Ausbildungszentren und Schulen wurden Lehr- und Lernangebote aus dem Bereich der angewandten Umwelttechnik für die Verbreitung über die Lernplattform entwickelt. Ausgewählte LCA-Angebote mit unterschiedlicher Komplexität mit den Endpunkten Energiebedarf, Wasserfußabdruck, Flächenverbrauch, CO₂-Fußabdruck und Ökobilanzierung sind verfügbar. Die Prozess-Daten sollten in grafischer Form und Stoffstromdiagrammen dargestellt werden, um finale Life Cycle Assessments sowie abschließende Prozessbewertungen zu ermöglichen. Die 33 LCA-Angebote wurden wenn möglich mit Praktika ergänzt. Die Entwicklung der Projektbausteine erfolgte zyklisch in Kooperation mit verschiedenen Bremer Schulen, Studierenden, Referendaren und mit dem Ausbildungszentrum der Universität Bremen in Anlehnung an das Modell Partizipativer Aktionsforschung. Die Materialien wurden übersetzt, um von unseren ausländischen Partnern auf Konsistenz und Durchführbarkeit evaluiert zu werden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Außendarstellung des Projekts erfolgt über eine Internet-Seite unter der URL www.LCA-meets-EfS.net. Dadurch sollte auch internationale Erreichbarkeit unserer o.g. Zielgruppen sichergestellt werden. Ein wichtiges Portal zur Verbreitung unserer Vorhabeninhalte sollte die GDCh und GDPh sowie der VDI sein, um Zugang zur Fachwissenschaft zu erhalten. Ferner fand eine Dokumentation der Projekteinhalte und -ergebnisse in einschlägigen Fachmedien für Fachdidaktik und naturwissenschaftlichen Unterricht statt. Ergebnisse aus dem Projekt werden auch über die Projektlaufzeit hinaus Gegenstand von Lehrerfortbildungen an den beteiligten Chemielehrerfortbildungszentren und auf Tagungen für Lehrkräfte der Naturwissenschaften sein. Eine stetige Neu- und Weiterentwicklung sowie Verbreitung der erstellten Materialien wird über das Internet sowie durch fachdidaktische Zeitschriften und Buchbeiträge erfolgen.

Fazit

Aufgrund der Corona-Pandemie bestanden seit März 2020 erhebliche Zugangsbeschränkungen für die Bremer Universität. Die Schülerlabore waren geschlossen. Eine zirkulare Bearbeitung der Inhalte erfolgte ab Herbst 2021. Es konnten 2 Publikation zu Thema veröffentlicht werden. 14 Qualifizierungsarbeiten (4 MEd., 10 BSc.) wurden erfolgreich abgeschlossen worden, 2 weitere sind in Bearbeitung.

1. Kurzfassung des Berichts

Mit der Agenda 2030 wird nachhaltige Entwicklung verstärkt in den Fokus gerückt und um neue Konzepte und Strategien erweitert. Prozesse in Alltag, Technik und Industrie sollen hin zu nachhaltiger Praxis transformiert werden. Dieses zu bewerten, ist aber keine leichte Aufgabe. In den vergangenen Jahrzehnten sind hierzu allerdings Techniken entwickelt worden, die man, wenn sie alle relevanten Auswirkungen eines Prozesses oder Produkts in die Betrachtung einbezieht, als Life Cycle Assessment (LCA) bezeichnet. Zentral für die Transformation unserer heutigen Welt im Sinne nachhaltiger Entwicklung ist die Chemie und die mit ihr verbundenen und auf ihr aufbauenden Wissenschaften und Wirtschaftsbereiche. Auch die Chemie muss sich nachhaltiger aufstellen; dies geschieht durch das Konzept der Green Chemistry (auch Nachhaltige Chemie). Da bereits in der Agenda 21 dargelegt wurde, wie wichtig Bildung für die nachhaltige Entwicklung unserer Gesellschaft ist, findet auch in der Chemie ein Umdenken statt und ein neuer Bereich in der chemiebezogenen Bildung wird in vielen Ländern zunehmend implementiert: Green Chemistry Education (GCE).

Zur GCE gehört das Wissen um eine veränderte Sicht der Chemie etwa im Bereich der chemischen Synthese und Produktion in Forschung und Industrie. Damit eng verbunden sind auch Kompetenzen in der umweltgerechten, rechtskonformen und sicherheitstechnischen Behandlung von Chemikalien und chemischen Produktionsprozessen. Bislang sind Bewertungsstrategien im Zusammenhang der Nachhaltigen Chemie, etwa das LCA, aber kaum Gegenstand der GCE. Ziel des Projekts ist die Entwicklung und Implementation einer digitalen Lernumgebung über Bewertungsstrategien und -methoden für den Umgang mit Chemikalien und chemierelevanten Prozessen. Dies betrifft sowohl das LCA als auch eingebundene Methoden, wie den CO₂- oder Wasserfußabdruck. Entwickelt wird eine Internetpräsenz, die es erlaubt, auf verschiedenen Niveaus in die Thematik einzuführen. Sie stellt zentrale Konzepte und Methoden vor und erläutert dies an Beispielen.

Der vorliegende Abschlussbericht stellt die im Förderzeitraum Februar 2019 bis August 2022 erarbeiteten Projektergebnisse dar. Im ersten Teil werden die Grundlagen eines Life Cycle Assessment dargestellt, die didaktische Konzeption und die Datenbasis und die Auswahl eines Software-Tool erläutert. Kurzexposés zu den entwickelten Schülerlaborangeboten fassen die verfügbaren Materialien zusammen und geben eine Information zur Umsetzung in vier Leistungsniveaus. Zielgruppen sind Schülerinnen und Schüler, Auszubildende in chemierelevanten Berufen, Studierende in naturwissenschaftlich-technischen Feldern und natürlich Lehrkräfte. Die Entwicklung basiert auf einem Design Research Ansatz, in dem die entwickelten Elemente kontinuierlich mit Lernenden erprobt und auf dieser Basis weiterentwickelt werden. Dies geschieht mit Schülerinnen und Schülern der gymnasialen Oberstufe, Auszubildenden im Beruf Chemielaborant/in und Lehramtsstudierenden. Insgesamt wurden so verschiedene Bewertungstechniken für den Unterricht, die Ausbildung und Lehre in der Chemie und verwandten Disziplinen evidenzbasiert entwickelt und über das Internet kostenlos zur Verfügung gestellt. Die Lernumgebung wird dann durch die Kooperation im Projekt auch in Englisch und Portugiesisch verfügbar sein und in den USA und Brasilien implementiert.

Der zweite Berichtsteil stellt die erzielten Ergebnisse vor, die in Form von Veranstaltungen und Teilnehmerzahlen, erfolgreichen Qualifizierungsarbeiten, Publikationen und Präsentationen belegt sind. Mit einer Betrachtung zur partnerschaftlichen Zusammenarbeit, der Unterstützung durch wissenschaftliche Kollegen und die DBU sowie einer Diskussion schließt dieser Bericht.

Alle im Berichtszeitraum entwickelten Unterlagen, das Arbeits- und Bildmaterial, Zahlen und Fakten zu Veranstaltungen sowie Präsentationen und Publikationen sind in digitaler Form auf der Projekt-Website hinterlegt.

2. Anlass und Zielsetzung des Projekts

2.1. Motivation

Unter einer Ökobilanz (Life Cycle Assessment - LCA) wird die systematische Analyse der Umweltwirkungen von Produkten während des gesamten Lebensweges verstanden. Dazu gehören sämtliche Umweltwirkungen während der Produktion, der Nutzungsphase und der Entsorgung des Produkts sowie die damit verbundenen vor- und nachgeschalteten Prozesse (z.B. Herstellung der Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe). Entlang der Produktlinie werden Inputs erfasst (wie etwa metallische Rohstoffe oder fossile oder erneuerbare Energieträger) sowie Outputs wie etwa Emissionen von umwelt- oder gesundheitsbelastenden Stoffen.

Dieses Vorhaben schlägt eine Brücke zwischen einer umfassenden systematischen Vermittlung von Bewertungskompetenzen zum Life Cycle Assessment einerseits und deren anwendungsorientierte Umsetzung an ausgewählten umweltrelevanten Beispielen andererseits. Anhand vorgefertigter Bewertungsleitfäden soll es Lernenden möglich sein, Schritt für Schritt aus verschiedenen Datenbanken die für die Bewertung relevanten Stoff- bzw. Prozessdaten zusammen zu stellen, um je nach gewähltem Bilanz-Endpunkt ein Produkt zu bewerten. Die Leitfäden sollen als methodische Arbeitshilfe verstanden werden, die der Orientierung innerhalb der komplexen Thematik „LCA/Ökobilanzierung“ dienen und die aktuell sechs wichtigsten Bewertungsmethoden aufgreifen (CML, Treibhausgasbilanz (CO₂-Fußabdruck), kritische Volumina, kumulierter Energieaufwand, virtuelles Wasser, UBA-Wirkungsindikatoren und eventuell noch die Umweltbelastungspunkte (UBPs)). Die gewählten Beispiele umfassen drei Anforderungsniveaus - easy, moderat, komplex -, die auf der Benutzeroberfläche der Website wählbar sind. Als sinnvolle Ergänzung wäre die Aufbereitung des LCA-Moduls in Form eines multi-touch Learning Books (MLB) für mobile Endgeräte denkbar.

Zielgruppen sind Studierende in Studiengängen mit engem Bezug zur Chemie, chemischen Technik, naturwissenschaftliche Lehrkräfte sowie Ausbilder und Auszubildende in chemisch-technischen Berufen. Eine „light-Version“ soll zudem für die interessierte Öffentlichkeit und den schulischen Chemieunterricht bereitgestellt werden [24-27].

Schülerinnen und Schülern sowie Auszubildenden und Studierende sollen die komplexe Thematik der Ökobilanzierung (LCA) kennen lernen und verstehen. Im Form vereinfachter ausgewählter Herstellungs-, Transport- und Verwertungsprozesse soll LCA als sinnvolles Bewertungstool angewendet werden. Dies fördert die Alltagskompetenzen bzgl. umweltrelevanter Fragestellungen, das Orientierungswissen über die Relevanz der Chemie für viele Umwelt- und Nachhaltigkeitsfragen, sowie Beurteilungs- und Bewertungskompetenzen der gewählten Anliegen im gesellschaftlichen Kontext. Somit steht nicht nur das fachliche Lernen im Blickpunkt.

Industrielle und gesellschaftliche Relevanz des Themas

Nachhaltigkeit ist inzwischen anerkanntes Ziel jeder Technologie- und Produktentwicklung. Seit einigen Jahren besteht in Unternehmen der chemischen Industrie und angrenzender Zweige ein steigender Bedarf an einschlägig ausgebildeten Fachkräften und Wissenschaftlern. Zum einen sollen diese Experten die Produktionsprozesse selbst effizienter gestalten, zum anderen genau diese firmenspezifischen Bemühungen der Öffentlichkeit angemessen präsentieren. Diese sogenannten „product-application skills“ gehören mittlerweile zum industriellen Anforderungsprofil chemischer Berufseinsteiger. Damit reagiert die chemische Industrie auf das zunehmende Wissen über die oftmals negativen Einflüsse von Chemikalien auf die Gesundheit von Mensch und Tier, deren Auswirkung auf

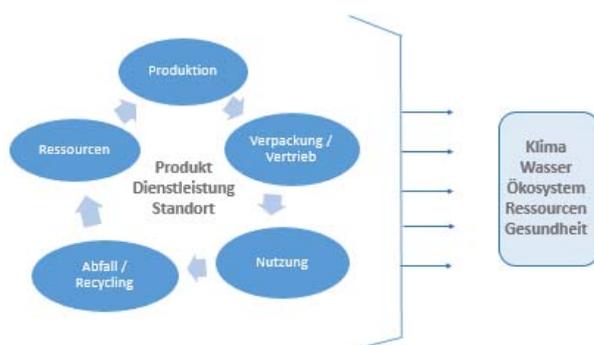
die Umwelt und die dadurch implizierte kritische Konsumentenhaltung bzw. auch auf Regulationen durch den Gesetzgeber [4,8].

Problembeschreibung und Ausgangssituation

Für eine nachhaltige Entwicklung von Technologien und Produktenwendungen kommen zwei grundsätzliche Herangehensweisen infrage. Die eine beruht auf existierenden Materialien und Ergebnissen, greift eher spät in die Produktentwicklung ein bzw. betrachtet sicherheits- oder umweltrelevante Aspekte im Nachhinein. Die zweite Herangehensweise versucht bereits im Vorfeld, mögliche Risikopotentiale und Schwachstellen im synthetischen Prozessablauf erkennbar zu machen und fördert so von Anfang an eine vorausschauende und umweltverträgliche Herstellungsweise von chemischen Grundstoffen, Arzneimitteln, technischen Hilfsmitteln etc. Bereits 1998 formulierten Anastas und Warner mit ihren „12 Prinzipien für eine nachhaltige Chemie“ konkrete Maßnahmen und Anforderungen an eine Ressourcen- und umweltschonende chemische Produktion [1]. Erst mit zunehmend knapper werdenden Rohstoffen (so sind z.B. gewisse Übergangsmetalle nur limitiert erhältlich) und steigenden Energiekosten rentiert es sich für Produzenten, in die Entwicklung neuer Syntheseverfahren sowie ressourcen- und energieeffiziente Prozessführungen „smart and safe by design“ zu investieren. Konsequentes und umweltverträgliches Recycling von Wertstoffen hat sich zu einem bedeutsamen Wirtschaftszweig entwickelt [3,8]. Die Bestrebungen der chemischen, pharmazeutischen und agrar-technischen Industrie, nachhaltig und umweltverträglich zu produzieren, sind global. Ihre kurzfristige ökonomische Wirksamkeit zu dokumentieren ist das eine, ihre Langzeitwirkung auf Ökosysteme werden dagegen erst mit großer Zeitverzögerung sichtbar [2,12].

In diesem Zusammenhang konnte sich die „Ökobilanzierung/LCA“ in den vergangenen 10 Jahren zu einem nützlichen und sinnvollem Steuerungs- bzw. Regulierungsinstrument für Produktionsprozesse mit ihren verknüpften Umweltwirkungen entwickelt. Zahlreiche Fachpublikationen liefern prozesstechnische, synthetische, energetische und sozio-ökonomische Fallbeispiele. Umfangreiche Datenbanken sind entstanden, die die Bewertungsgrundlagen für Modellierungen und Simulationen liefern. Wie auch die human- und ökotoxikologische *Risikobewertung* von Chemikalien mit Hilfe der TSAR (Struktur-Wirkungs-Betrachtungen) oder die Vorhersage zum Verbleib als auch Nachweis von Xenobiotika in Flora und Fauna durch *Metabolomics* kann somit auch die Ökobilanzierung/LCA zu den „neuen“ interdisziplinären Fachwissenschaften gezählt werden, die sich als eigenständige Teildisziplinen innerhalb der Naturwissenschaften etabliert haben.

Als international genormte Methoden (DIN ISO 14040 und 14044) sind die LCA und die Ökobilanzierung zur umweltorientierten Analyse von Produktsystemen während des gesamten Lebensweges (from



cradle to grave) anerkannt. Sie eignen sich zur Erfassung und Bewertung von umweltrelevanten Vorgängen sowohl in der Produktion und Nutzung als auch bei der Entsorgung eines Produktes. Hier sind besonders die Auswirkungen auf klimatische, ökologische und gesundheitliche Aspekte zu nennen.

Abbildung 1: Systematischer Aufbau eines Life Cycle Assessments

Die Basis für glaubwürdige Aussagen einer LCA bzw. Ökobilanz bilden große Datenbanken und Software-Tools, die über umfangreiches Datenmaterial zu stoffspezifischen Kenndaten, Wasser- und Energieverbräuchen unterschiedlicher Prozesse, Treibhausgasemissionen, CO₂-Fußabdrücken, toxikologischen Auswirkungen von Stoffen auf Mensch und Tier u.v.m. verfügen. Diese Stoffstromanalysen können mit Hilfe von Sankey-Diagrammen visualisiert werden. Die Anwendung dieser Tools ist komplex und richtet sich in erster Linie an produzierende Unternehmen und regulierende Behörden.

Die Betrachtung von Stoffströmen, die Systemanalyse und die Abschätzung von Folgen durch alte aber auch neue Technologien ist ein noch junger interdisziplinärer Wissenschaftszweig. Er erfordert von den ausführenden Akteuren nicht nur naturwissenschaftliche und technische Kenntnisse, sondern schließt betriebswirtschaftliche Denkweisen, IT-Affinität zur Modellierung und Simulation sowie sozio-ökonomische Kompetenzen mit ein. Die Technik der Lebenszyklus-Analyse kann wichtige Erkenntnisse über Möglichkeiten und Grenzen eines chemischen Produktionsprozesses, einer sicherheitstechnischen Risikoanalyse von Chemikalien oder deren Auswirkungen auf Ökosysteme liefern und stellt die erforderliche Basis für regulatorische Maßnahmen dar. Deshalb versetzen große Unternehmen entweder durch intensive Schulungen ihre eigenen Mitarbeiter selbst in die Lage die firmeneigenen Produktionsprozesse und Produkte mit der gesamten Peripherie hinsichtlich Ökobilanz /LCA zu bearbeiten oder aber ziehen begleitende Dienstleister hinzu [13,15,16,17].

Durch den Einsatz der LCA können sowohl globale sozio-ökologische Probleme als auch räumlich eng begrenzte Szenarien betrachtet werden. Zu nennen wären die Auswirkungen des Klimawandels, die Ozeanversauerung, der Verbrauch fossiler und mineralischer Ressourcen sowie die Frischwasser-Eutrophierung und die damit verbundenen ökotoxikologischen Veränderungen, deren Reichweiten nur im globalen Zusammenhang deutlich werden. Aber auch im lokal begrenzten Umfeld sind LCA aufschlussreich. So helfen sie z.B. im medizinischen Bereich bei der Betrachtung eines Pharmakons an seinem Wirkort oder geben Aufschluss über Frisch- und Abwasserströme bei chemischen Synthesen.

2.2. Kontext

Die Arbeit wird von der Abteilung Chemiedidaktik des Instituts für Didaktik der Naturwissenschaften betreut. Hier wird ein Projekt zu dem Thema durchgeführt, dass von der Deutschen Bundestiftung Umwelt (DBU www.dbu.de, Az 34574) gefördert wird. Dieses Vorhaben schlägt eine Brücke zwischen einer systematischen Vermittlung von Bewertungskompetenzen zum LCA einerseits und deren anwendungsorientierte Umsetzung an ausgewählten umweltrelevanten Beispielen als Beitrag zur GCE andererseits. Anhand vorgefertigter Bewertungsleitfäden soll es Lernenden möglich sein, Schritt für Schritt aus für sie konzipierten Datenbanken die für die Bewertung relevanten Daten eines Produkts mit definiertem Bilanz-Endpunkt zusammen zu stellen. Digitale Leitfäden sollen als methodische Arbeitshilfe verstanden werden, die der Orientierung innerhalb der komplexen Thematik LCA dienen und die aktuell sechs wichtigsten Bewertungsmethoden aufgreifen (CML, Treibhausgasbilanz (CO₂-Fußabdruck), kritische Volumina, kumulierter Energieaufwand, virtuelles Wasser, UBA-Wirkungsindikatoren und eventuell noch die Umweltbelastungspunkte (UBPs)).

Die Arbeitsgruppe Softwaretechnik der Informatik des Fachbereichs 3 (Bernhard Berger) sowie das ZMML (Dr. Ogurol, Hr. Kuhlmann) sowie vom Typo3-Contentmanagement (Hr. Teller) steuern ihr Wissen über die Anforderungen an die Sankey-Software und die Anbindung an ein geeignetes interaktives und international wirksames Webportal bei.

3. Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Ziel des Projekts war die Entwicklung einer multimedialen Lernumgebung mit voraussichtlich fünf Bausteinen (Tabelle 1). Es wurden begleitend fünf Szenarien zur Nutzung der Lernumgebung entwickelt für den Einsatz im schulischen Unterricht der Sekundarstufen I und II, den Einsatz in Schülerlaboren (Niveau Ende Sekundarstufe I/Sekundarstufe II), der beruflichen Ausbildung und dem Grundstudium an der Universität. Es handelte sich dabei um Simulationen, die sich aus den Prozessdaten zu Energieumsätzen, Flächen- und Rohstoffverbräuchen sowie Transportaufwendungen des LCA-Tool SimaPro5 speisten. Gegenstand der Beispiele in den Bausteinen waren Methoden und Best Practice Beispiele für LCA.

Tabelle 1: Arbeitspakete und Inhalte des Angebots

Arbeitspaket	Baustein	Status	Inhalt	
Arbeitspaket 1	Baustein 1	✓	Grundlagen: Was ist LCA?	Arbeitspaket 10: Begleitende Evaluation und sukzessive Implementation
Arbeitspaket 2		✓	Datengrundlage und Software-Tools identifizieren	
Arbeitspaket 3		✓	Anwendungsbeispiele der LCA aufarbeiten	
Arbeitspaket 4	Baustein 2	✓	Prozesse mit einem Produkt	
Arbeitspaket 5	Baustein 3	✓	Komplexe Prozesse mit Vergleich zweier Produkte	
Arbeitspaket 6	Baustein 4	✓	LCA in der Laborpraxis	
Arbeitspaket 7	Baustein 5	✓	LCA als Steuerungselement für nachhaltige Synthesen	
Arbeitspaket 8		✓	Visualisierung, Digitalisierung, Veröffentlichung	
Arbeitspaket 9		✓	Übersetzung und Veröffentlichung	

Das Antragsprojekt „**GCE meets LCA**“ gliederte sich in zehn Arbeitspakete, die miteinander verzahnt waren und aufeinander aufbauten (Tabelle 1). Es rekonstruierte didaktisch wichtige Grundlagen und Bewertungsprozesse im Rahmen von LCA entlang ausgewählter Beispiele mit einer weiten Komplexitätsspanne.

3.1. LCA-Begrifflichkeiten und Komplexität

Die Terminologie der „Fachdisziplin LCA“ verwendet eine Vielzahl an Begrifflichkeiten, Definitionen, Abkürzungen und Maßeinheiten, dass die Gefahr besteht, Lernende schnell zu frustrieren. Ziel soll es sein, die beispielhaften Produktionsprozesse didaktisch so zu reduzieren, dass sie die wesentlichen Informationen transparent und korrekt darstellen, ein „data overload“ jedoch unbedingt vermieden wird. Ein Artikel zu dieser Problematik ist dazu verfasst und in CHEMKON publiziert (**Nachhaltigkeit bewerten im Chemieunterricht** von *Christian Zowada, Michael Linkwitz, Antje Siol & Ingo Eilks* –CHEMKON 2020, 27, Nr. 8, 365 – 372 <https://doi.org/10.1002/ckon.201900051>).

Mit den **Systemgrenzen** muss jedoch vor Beginn einer Analyse festgelegt werden, wie umfassend ein Produkt oder eine Dienstleistung betrachtet werden soll und welche Lebensphasen zu berücksichtigen sind. Für Endkonsumentenprodukte werden alle Lebensphasen einschließlich der Distribution, Nutzung und Entsorgung der betreffenden Produkte erfasst. Dieser Ansatz wird „Cradle-to-Grave“ genannt. Die Hersteller von Industrieprodukten wissen jedoch oft nicht im Detail, welche weiteren

Prozesse und Verarbeitungsschritte ihr Halb-/Vor-/Teilprodukt bei ihren Kunden durchläuft. Deshalb werden für Industrieprodukte häufig nur die Lebensphasen bis zum eigenen Werkstor in die Analyse eingebunden. Dieser Ansatz wird „Cradle-to-Gate“ genannt. Die Ergebnisse einer solchen Analyse können beispielsweise vom industriellen Kunden benutzt werden, um eine vollständige Lebenszyklusanalyse für ein komplexeres Endprodukt durchzuführen.

Für die Lebenszyklusanalyse eines Blattes Papier beginnt man beispielsweise damit, die Menge an Energie und Grundchemikalien zu erfassen, die zur Herstellung einer bestimmten Menge jedes einzelnen Inhaltsstoffs notwendig sind sowie die mit dieser Herstellung verbundenen Emissionen und Abfälle. Die Zahl der für jeden Prozess zu berücksichtigenden Eingangs- und Ausgangsstoffe kann im Detail sehr groß werden. Um das gesamte Netzwerk von Prozessen auswerten zu können, benötigt man daher eine spezialisierte Software. Diese Software ermittelt die Stoffströme bezogen auf einen Referenzfluss, der die zuvor festgelegte funktionelle Einheit abbildet.

Die **Funktionelle Einheit** ist die wichtigste Bezugsgröße in einer Lebenszyklusanalyse. Alle späteren Quantifizierungen beziehen sich auf die zu Beginn festgelegte funktionelle Einheit. Beispiele für funktionelle Einheiten sind etwa „Reinigung von 10 Kilogramm Holzschnitzel“ oder „Transport von Orangensaft, frisch in einem Kühlcontainer, 20 Fuß“. Wenn die Umweltauswirkungen von zwei Produkten verglichen werden sollen, müssen beide die gleiche funktionelle Einheit besitzen. Beispielsweise ist die „Herstellung von 1 L Orangensaft“ als funktionelle Einheit zu ungenau, da der Orangensaft sowohl frisch gepresst als auch aus Konzentrat hergestellt sein kann. Diese beiden Varianten lassen sich daher nicht miteinander vergleichen, weil zum einen die Energiebedarfe und Kosten für die Konzentrierung des Frischsaftes berücksichtigt werden müssen und zum anderen für das Konzentrat andere Lagerungs- und Transportbedingungen gelten als für den Frischsaft. Gleiches gilt auch für die Kultivierung der Orangen im Ländervergleich (Brasilien, Südafrika, Israel und Spanien) – dafür sind Daten zur geologischen und klimatischen Voraussetzung im jeweiligen Erzeugerland mit einzubeziehen, da diese Auswirkungen auf die Qualität der Produkte haben, weil Bewässerung, Düngung und ggf. erforderlicher Pflanzenschutz unterschiedlich angewendet werden.

Das primäre Ergebnis der Stoffstromanalyse ist **die Sachbilanz**, auch „Lebenszyklusinventar, LCI“ genannt, bezogen auf die funktionelle Einheit. Darin werden alle Materialien erfasst, die in das festgelegte System eingehen, zum Beispiel Rohstoffe, Energieträger, Elektrizität. Auf der anderen Seite sind alle Stoffe aufgeführt, die das System verlassen, beispielsweise Emissionen in die Luft oder in den Boden sowie in Abwasserströme oder Materialien, die später in Recyclingprozesse einmünden.

3.2. Definition der betrachteten Endpunkte



A) Der Begriff „**virtuelles Wasser**“ wurde 1995 vom Geologen J.A. Allan geprägt und beschreibt die einem Produkt enthaltene Wassermenge. Unter diesem Aspekt können beide Begriffe synonym verwendet werden. Jedoch verfolgt der „**Wasserfußabdruck**“ ein weiterführendes Konzept, das sich nicht nur auf ein einzelnes Produkt beschränkt, sondern den durch das Konsumverhalten von Personen, Gemeinden und Länder anfallenden gesamten Wasserumsatz erfasst oder die Bedarfe von Produzenten kalkuliert. Dieses multidimensionale Konzept berücksichtigt dabei

auch die Orte, die Quellen und die Arten des Wassergebrauchs und geht daher explizit auf die lokalen Bedingungen des Wassergebrauchs ein.

Der LCA-Endpunkt „**virtuelles Wasser**“ / **Wasserfußabdruck** ist ein empirischer Indikator, mit dem dargestellt wird, wieviel Wasser bei der Produktion, dem Transport, der Verwendung und abschließenden Entsorgung eines Agrar- oder Industrieproduktes verwendet und verschmutzt wird. Es ist eine multidimensionale Betrachtung, mit der sowohl die Volumina als auch die Art, Weise und Dauer des Wassergebrauchs am jeweiligen Nutzungsort visualisiert werden.

Der Wasserfußabdruck einer Person, einer Gemeinschaft oder eines Unternehmens bezieht sich dabei immer auf das Gesamtvolumen an Frischwasser (Süß-W., Trink-W.). Da dessen Ressourcen weltweit limitiert sind, wird der Wasserfußabdruck als ein Instrument zur Bewertung für eine nachhaltige und effiziente Wassernutzung herangezogen. Das Konzept beschreibt mit dem grünen und dem blauen Wasserfußabdruck quantitative Aspekte, der graue Wasserfußabdruck stellt einen Indikator für die Wasserqualität dar. Aussagen, wie zum Beispiel der Zugang der Bevölkerung zu sauberem Trinkwasser, können mit Hilfe des Wasserfußabdrucks nicht getroffen werden. Außerdem gilt der Wasserfußabdruck nur für Süßwasser. Die Verschmutzung der Ozeane wird nicht betrachtet.

Für eine Bewertung des direkten und des indirekten Wasserverbrauchs ist die lokale Verfügbarkeit von Wasser entscheidend. Ein hoher Wasserfußabdruck in wasserreichen Regionen ist weniger problematisch als ein hoher Wasserfußabdruck in wasserarmen Regionen oder Wüstengebieten. Ist der Wasserfußabdruck (zu) groß, müssen Maßnahmen folgen. Eine Option ist eine gezielte Veränderung des Verbrauchs. Dies ist aber erst möglich, wenn genügend Informationen vorliegen, die einen gezielten Verzicht auf Produkte ermöglichen, die wegen ihres hohen Wasserverbrauchs erhebliche Folgen für Mensch und Umwelt am Produktionsstandort haben. Die Identifizierung von Gebieten mit Wasserknappheit und die Beurteilung eines übermäßigen Wasserverbrauchs sind wegen der internationalen Verantwortung wichtig. Das Konzept des Wasserfußabdrucks kann den versteckten Wasserhandel zu Lasten wasserarmer Länder transparenter machen. Es geht aber nicht generell darum, die Menge des genutzten Wassers zu reduzieren. Sondern es geht um Handlungsoptionen für Regionen, in denen eine Wasserübernutzung durch Export von wasserintensiven Produkten zu negativen ökologischen und sozialen Auswirkungen führt. Ziel ist die nachhaltige Nutzung der erneuerbaren Wasserressourcen.

Im LCA eines Produktes oder einer Dienstleistung spielt der Wasserfußabdruck bei der Bewertung eine indikative Rolle. Die Verfügbarkeit produktrelevanter Ressourcen und deren messbare Umwelteinflüsse ermöglichen eine Identifizierung besonders hoher Wasserbedarfe oder Verunreinigungen innerhalb eines Produktionsprozesses. Diese sollen konsequenterweise immer zur Verbesserung der Produktionsbedingungen führen.

Normierung: Der Begriff „Fußabdruck“ wird mit einer messbaren Größe in Verbindung gebracht.

Der Wasserfußabdruck beschreibt den Wassergebrauch in KUBIKMETER/JAHR [m^3/a]



B) Für die Berechnung des **Flächenverbrauchs** können zwei Ansätze verfolgt werden. Auf Basis der Daten von anerkannten Datenbanken, wie beispielsweise FAOSTAT und Destatis, lassen sich zunächst die tatsächlich beanspruchten Flächen berechnen, die für eine bestimmte Menge Produkt, in einer bestimmten Region benötigt wurden. Vor allem, wenn regionale oder nationale Aspekte der Landnutzung betrachtet werden sollen, ist diese Art der Berechnung vorteilhaft.

Um aber abzuschätzen, inwieweit der Mensch die verfügbare Biokapazität der Erde nutzt und ob der derzeitige Lebensstil dauerhaft aufrechterhalten werden kann, wurde zuerst 1997 von Wackernagel und Rees ein weiteres Werkzeug zur Berechnung erstellt. Für diesen „ökologischen Fußabdruck“ wird die biologisch produktive Fläche (Angebot) der (anthropogenen) Nachfrage gegenübergestellt.

Die bioproduktiven Flächen werden in unterschiedliche Kategorien aufgeteilt. Bebautes Land trägt beispielsweise weniger zur biologisch produktiven Fläche bei, als Ackerland. Im Einzelnen wird unterschieden zwischen Erntefläche, Weidefläche, Fischereigrund, Waldfläche, Energieland sowie bebautem Land für Gebäude, Straßen und Schienen. Für die Berechnungen wird jeder Kategorie ein Äquivalenzfaktor zugewiesen, sodass die realen Flächen in globale Hektar umgerechnet werden können. Der globale Hektar ist eine Standardflächeneinheit zur Berechnung des Verhältnisses zwischen biologisch produktiver Fläche und Ressourcenverbrauch durch den Menschen.

Ernteflächen sind aber nicht in allen Ländern gleich produktiv, Die bioproduktiven Flächen werden zunächst mit dem Ertragsfaktor des jeweiligen Landes multipliziert. Durch diese Umrechnung kann ein global vergleichbarer Ertrag ermittelt werden, der mit dem Äquivalenzfaktor multipliziert wird. Zur Berechnung der Erntefläche eines bestimmten Produktes stehen komplexe Formeln zur Verfügung, die dafür verwendet werden können. Dabei ist, wie auch beim Wasserfußabdruck, zu bedenken, dass die Berechnung für ein tierisches Produkt zunächst viele einzelne Berechnungen für die Futtermittel erfordert, die dann aufsummiert werden.

Länder und ihre landwirtschaftlichen Nutzflächen - ein Vergleich Quelle: WELTBANK, 2015

Land	Nutzfläche	Anteil an Landesfläche
	km ²	%
Brasilien	2.825.890	33,8
China	5.278.330	56,2
Deutschland	167.310	48,0
Indien	1.797.210	60,4
Kasachstan	2.169.920	80,4
Libyen	153.500	8,7
Peru	243.306	10,0
Russland	2.177.218	13,3
USA	4.058.625	44,4

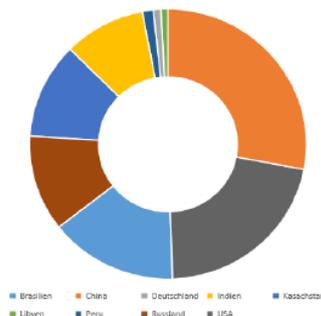


Abbildung 2: Länderflächen und Nutzflächenanteile ausgewählter Länder (Quellen Faostat, Geological Survey, beide 2020)

Normierung: Der Begriff „Fußabdruck“ wird mit einer messbaren Größe in Verbindung gebracht.

Der ökologische Fußabdruck hat die Maßeinheit für den Bedarf an bioproduktiver Fläche in HEKTAR [ha = 10.000 m²].

Quellen: a Giljum et al. 2007: Wissenschaftliche Untersuchung und Bewertung des Indikators „Ökologischer Fußabdruck“,
 b Umweltbundesamt Forschungsbericht 363 011 35, ISSN 1862-4804, UBA Footprint_Endbericht_070222_SG.doc (uba.de), S.59 [10.06.21]
 c Wackernagel & Rees 1997: Wackernagel, M., Rees, W., Unser ökologischer Fußabdruck, 1997, Springer Basel AG
 d FAOSTAT <https://www.fao.org/faostat/en/#country/79>
 e destatis 2019a: Flächenbelegung von Ernährungsgütern 2010 - 2017 - Statistisches Bundesamt (destatis.de) [01.07.21]
 destatis 2019b: Flächenbelegung von Ernährungsgütern tierischen Ursprungs 2010 - 2017 - Statistisches Bundesamt (destatis.de) [10.06.21]



C) Der **CO₂-Fußabdruck** (*carbon footprint*) erfasst die Menge an CO₂-Emissionen, die ein Produktionsprozess, ein Produkt oder ein Mensch in einer bestimmten Zeit verursacht. Bei dem CO₂-Fußabdruck handelt es sich um einen eindimensionalen Ansatz der Ökobilanzierung. Entwickelt wurde das Modell des CO₂-Fußabdruck von Wackernagel und Rees im Jahre 1994.

Kohlenstoffdioxid CO₂ wird aus dem Erdinneren von aktiven aber auch inaktiven Vulkanen freigesetzt. Als essenzielles Gas für das Leben auf der Erde wird es vom Phytoplankton (Pflanzen und Algen) als Grundpfeiler der Nahrungskette genommen, verstoffwechselt und sein Stoffwechselprodukt O₂ wieder ausgeatmet. Höhere Lebewesen (Bakterien, Tiere und Menschen) atmen wiederum Sauerstoff ein und als "Verbrennungsprodukt" CO₂ aus. Dieser Prozess wird als Photosynthese bezeichnet. CO₂ ist also ein essenzielles Gas für das Leben auf der Erde, ohne ihn gäbe es kein Wachstum.

Durch den zunehmenden Einfluss der Technosphäre auf die Biosphäre gerät dessen Gleichgewicht zunehmend in Schiefelage. Der Anteil von CO₂ in der Atmosphäre stieg in den vergangenen 50 Jahren von 0,031 Volumenprozenten auf derzeit 0,04 Vol.%. Es befindet sich vor allem in Luftschichten der Stratosphäre und wird über Windströme über den Globus verteilt. Es ist messtechnisch gut erfassbar.

Normierung: Der Begriff „Fußabdruck“ wird mit einer messbaren Größe in Verbindung gebracht.

Der CO₂-Fußabdruck stellt die Menge an klimabeeinträchtigenden Gasen (GHGs) dar, die als CO₂-Äquivalente in TONNEN [t] dargestellt werden.

Tabelle 2: Treibhausgase in der Übersicht

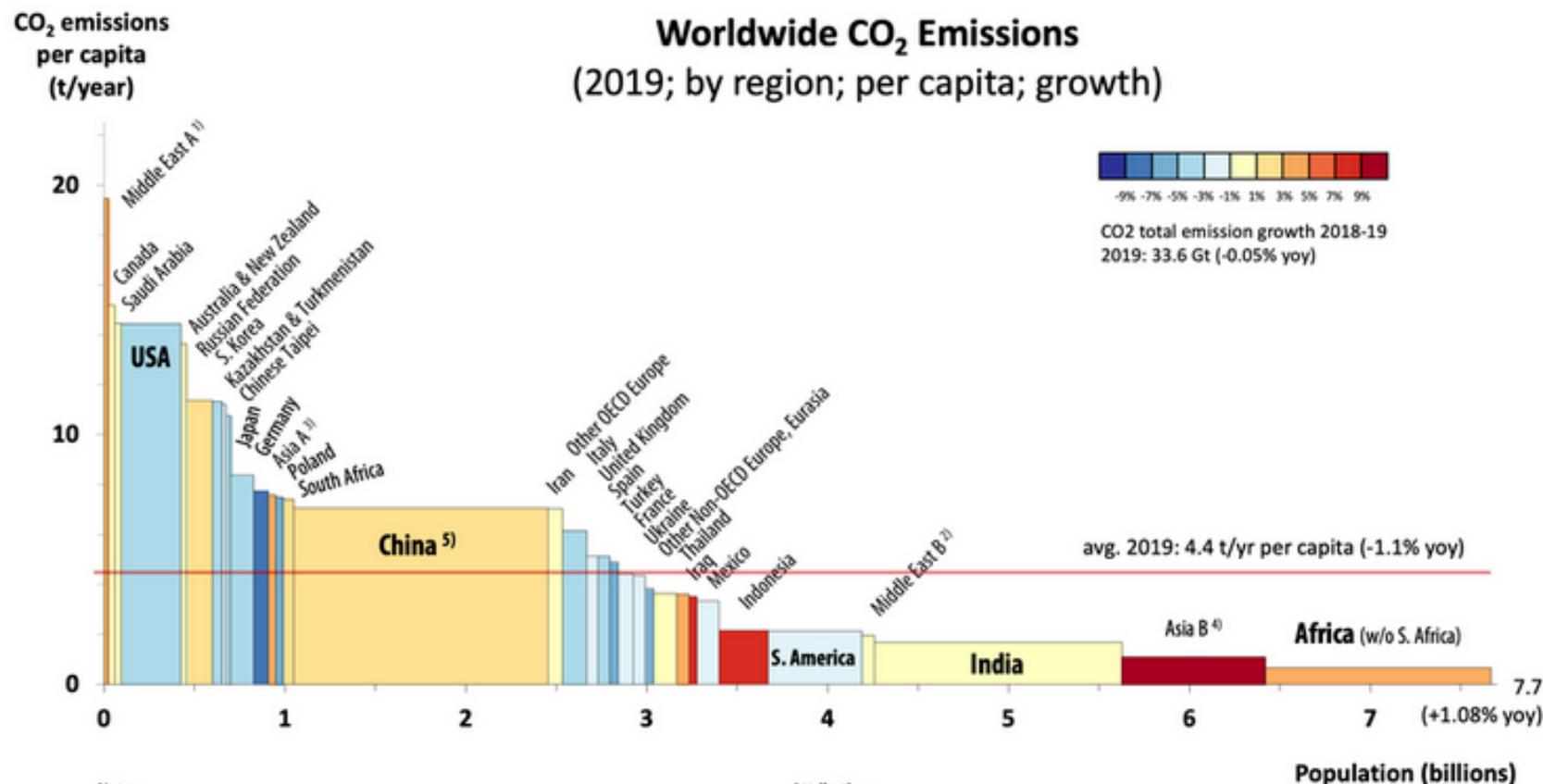
Klimagas	Klimawirksamkeit (global warming potential, GWP)	Quellen	Atmosphärische Verweildauer	Anstieg in der Atmosphäre (1750 – 2000)
Wasser als Gas (H ₂ O(g))	< 1	Wasserverdunstung	gering	unbekannt
Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	1	Verbrennung fossiler Brennstoffe (Kohle, Gas, Öl, Benzin), Fahrzeuge, Kraftwerke, Heizung, Brandrodung, Mülldeponien, Atmung von Menschen, Tieren, Mikroorganismen	< 150 Jahre *	+ 35%
Lachgas (N ₂ O)	296	Stickstoffdüngung, Brandrodung, Verbrennung von Biomasse, Reisanbau, Mülldeponien, Kraftverkehr	114 Jahre	+ 10%
Methan (CH ₄)	23	Landwirtschaft (Reisanbau), Sumpf-, Moor-, Feuchtgebiete, Mülldeponien/Abfall-wirtschaft, Viehhaltung (v.a. Wiederkäuer wie Rinder), Gewinnung und Verbrennung fossiler Energieträger (Kohle, Öl, Gas)	12 Jahre	+ 120%
Halogenierte Kohlenwasserstoffe (z.B. FCKW)	Bis 20.000	Treibgas in Spraydosen, Lösemittel, Kühlmittel, Schäumittel	> 1.000 Jahre	Nicht natürlich
Ozon (O ₃), bodennah		Aus Stickstoffoxiden und Kohlenwasserstoffen mit Hilfe von UV-Strahlung		
Schwefelhexafluorid (SF ₆)	Bis 20.000		3.2000 Jahre	Nicht natürlich

CO₂ ist jedoch als Stellvertreter der Substanzklasse GHG zu verstehen. Maßnahmen zur Verhinderung bzw. Verminderung nicht nur der CO₂-Emissionen sind notwendig.

Möchte man wissen, wie die persönliche **Klimabilanz** aussieht, kann der CO₂-Fußabdruck mit Hilfe von Kalkulatoren berechnet werden. Hierzu sind einige Angaben zum Stromverbrauch, Heizbedarf, Konsumverhalten, Essgewohnheiten und Transport notwendig. Diese CO₂-Bilanz zeigt auf, wie man im Durchschnitt dasteht: Bei einem großen Fußabdruck, werden überdurchschnittlich viele Emissionen verursacht; ein kleiner Fußabdruck hingegen impliziert ein klimafreundliches Leben.

Umseitige Abbildung 3 demonstriert die Anteile an CO₂-Emission in Bezug zur Bevölkerung pro Land (Kontinent) für das Jahr 2019. Je „blauer“ ein Land hinterlegt ist, desto höher ist sein CO₂-Anteil in Relation zur Bevölkerungsdichte.

Abbildung 3: CO₂-Emissionen weltweit 2019



Notes:

CO₂ emissions from fuel combustion only; no other greenhouse gases or natural sources; aviation and marine bunkers not shown as territory but included in average and totals.

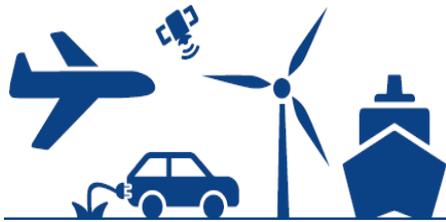
- ¹⁾ Middle East A: Bahrain, Oman, Kuwait, Qatar, United Arab Emirates
- ²⁾ Middle East B: Israel, Jordan, Lebanon, Syrian Arab Republic, Yemen
- ³⁾ Asia A: Brunei Darussalam, Malaysia, Mongolia, Singapore
- ⁴⁾ Asia B: Asia without Asia A, China, India, Thailand, Chinese Taipei, Indonesia, S. Korea, Japan
- ⁵⁾ China: People's Rep. of China, Hong Kong

Attribution:

Based on IEA (2021), "Greenhouse gas emissions from energy", www.iea.org/statistics. All rights reserved; as modified by Thomas Schulz, AQAL Capital GmbH. This map is without prejudice to the status of or sovereignty over any territory, to the delimitation of international frontiers and boundaries and to the name of any territory, city or area. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

Version:
02-Nov-2021 by Thomas Schulz, AQAL Capital GmbH
<https://aqalcapital.com/2019-worldwide-co2-emissions>





D) Primärenergiefaktoren (PEF) am Beispiel von Mobilität und Transport - regional, national, global.

Nicht nur Rohstoffe, Bauteile, Kleidung oder Lebensmittel werden um die ganze Welt transportiert, auch Tiere und Menschen sind mobil. Die Voraussetzung für den globalen Handel ist eine ausgebaute und leistungsfähige Verkehrsinfrastruktur und die

Bereitstellung von Energie in Form von Brenn- und Treibstoff sowie Strom. Sie ist ein wichtiger Faktor in der Betrachtung von Lebenszyklusanalysen. Zeit und Frachtmengen bestimmen die Energiebedarfe und Emissionen und somit Kosten des Waren- und Personentransports.

Um die Umweltbelastung durch die Transportmittel ermitteln zu können, müssen Daten erhoben werden, die alle Bedarfe und Emissionen zur Herstellung, zum Betrieb, zum Verschleiß, zur Auslastung und letztendlich auch zur Entsorgung des LKW oder Flugzeugs ein schließen. Diese Umweltauswirkungen werden in [kg CO₂-Äquivalenten] angegeben, und der Anteil aus fossilen Quellen extra ausgewiesen. Die Umweltbelastungspunkte geben an, in wie weit sich eine Transportart belastend auf die Umwelt auswirkt. Je kleiner der Wert hier also ist, desto nachhaltiger ist die Transportform.

Diese komplexen Datensammlungen sind Grundlage für Normierungen sogenannter Primärenergiefaktoren (PEF). PEF sind Indikatoren zur Beschreibung der Energieeffizienz. Sie umfassen neben dem eigentlichen Nutzungsenergiebedarf einer Synthese oder eines Prozesses auch die Energiemengen, die in vor- als auch nachgelagerten Prozessschritten benötigt werden. Primärenergiefaktoren berücksichtigen den Energieverlust, der bei der Gewinnung, Umwandlung und Verteilung eines Energieträgers (fossil, nuklear, erneuerbar) in [Mega Joule-Äquivalenten] anfällt. Sie zeigen also an, aus welcher Quelle wie viel Energie kommt, um beispielsweise mit einem Bus eine Schulklasse einen Kilometer weit zu fahren.

Durch die Vereinfachungen gelingt es - abhängig vom Fahrzeugtyp und dessen Nutzlast, der Länge des Transportweges, der Art des verwendeten Treibstoffs und dessen Quelle - Vergleiche beispielsweise zwischen regionalen und internationalen Lieferwegen oder verschiedenen Transportmitteln vorzunehmen zu können.

Normierung: Primärenergiefaktoren und Umweltauswirkungen von Transportleistungen [pro tkm]

In der Tabelle 4 sind Energieverbräuche und Umweltbelastungen in Verbindung mit dem Betrieb eines Fahrzeugs, der benötigten Verkehrsinfrastruktur (Bau, Unterhalt, Rückbau) und dem Fahrzeug selbst (Herstellung, Unterhalt und Entsorgung) aufgeführt.

Die Angaben für die Luftfracht gelten für reine Frachtmaschinen ohne Passagiertransport

PRIMÄRENERGIEFAKTOREN und UMWELTAUSWIRKUNGEN für den Gütertransport	Luftfracht	Hochseefrachter	Binnenfrachter	Güterzug	LKW über 28 t	LKW 3,5 bis 28 t	Lieferwagen bis 3,5 t	Tonnenkilometer [tkm]	
								Bezugsgröße	
Primärenergiefaktor total	16.39	0.17	0.66	0.81	2.36	4.65	26.2		
fossil	16.02	0.15	0.61	0.18	2.21	4.31	22.71		
nuklear	0.31	0.01	0.04	0.37	0.12	0.28	2.89		
total erneuerbar	0.06	0	0.01	0.26	0.03	0.06	0.6		
aus Abfall/Abwärme	0	0	0	0	0	0	0		
CO ₂ -Äquivalente	1.101	0.011	0.046	0.014	0.137	0.28	1.541		
CO ₂ fossil	1.08	0.01	0.044	0.013	0.131	0.267	1.452		
UBP (Umweltbelastungspunkte)	UBP 06	786	18	54	37	150	315	1714	
Auslastung durchschnittl.	[t]	24	32500	710	343	10	3	0.3	

- Quellen: <https://ecoinvent.org/> | <https://nexus.openlca.org/search/query=transport> | <https://simapro.com/>
- Statista <https://de.statista.com/statistik/studie/id/6329/dokument/transport-und-logistikbranche-deutschland-statista-dossier/>
- Frischknecht R., Stucki M., Flury K., Itten R. and Tuchschnid M. (2012) [Primärenergiefaktoren von Energiesystemen](#), Version 2.2, Juli 2012. im Auftrag des Bundesamtes für Energie BfE, ESU-services Ltd., Uster, CH.
- Link <https://www.mobitool.ch/de/tools/mobichack-v2-0-24.html> des Schweizer ESU-Instituts



E) Ökobilanz und Life Cycle Assessment (LCA) Die Ökobilanz oder Lebenszyklusanalyse nach DIN EN ISO 14040/44 dient dazu, die potenziellen Umweltauswirkungen eines Produktsystems über den gesamten Lebensweg zu beurteilen. Eine Ökobilanz besteht aus vier Phasen: der Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, der Sachbilanz, einer Wirkungsabschätzung und der Auswertung. Wenn keine Wirkungsabschätzung vorliegt, wird eine Studie als Sachbilanz bezeichnet.

Die Entnahme, Verarbeitung und Nutzung von Ressourcen hat immer Auswirkungen auf die Umwelt, also den Boden, das Wasser und die Luft. LCA und Ökobilanzen von Produkten werden erstellt, um diese Umweltauswirkungen ausgehend von der Gewinnung der Rohstoffe, über Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse, bis hin zu Verteilung, Vertrieb und Verwendung, zu messen und zu vergleichen. Die Ergebnisse einer Ökobilanz können dazu dienen, Prozesse zu optimieren und Umweltbelastungen zu verringern.

Um die ermittelten Daten vergleichen zu können, erfolgt die Erstellung der Ökobilanz eines Produkts nach internationalen Normen. Eine Ökobilanz beginnt mit der Festlegung des Umfangs der Bewertung, d. h. der Grenzen für die in die Berechnungen einzubeziehenden Inputs und Outputs.

Ein System könnte beispielsweise den gesamten Produktlebenszyklus umfassen, d. h. alles von der Gewinnung der Rohstoffe aus der Erde bis zur Entsorgung auf einer Mülldeponie. Dies wird als Ökobilanz "von der Wiege bis zur Bahre" („cradle-to-grave“-LCA) bezeichnet. Alternativ kann das System verkleinert werden und dabei alles von den Rohstoffen bis zum Ausgang der Produktionsanlage („cradle-to-gate“-LCA) oder nur die Vorgänge vom Eingang bis zum Ausgang der Produktionsanlage („gate-to-gate“-LCA) selbst umfassen.

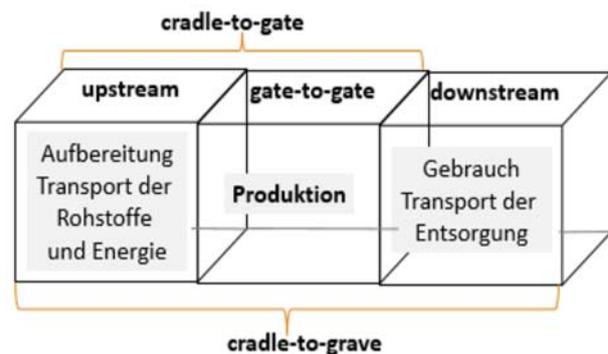


Abbildung 4: LCA in seinen Systemgrenzen

Die Größe des betrachteten Systems wirkt sich unmittelbar auf das Ergebnis aus. Ein größerer Rahmen führt zu umfassenderen Ergebnissen, aber auch zu einer komplizierteren Analyse. Umgekehrt ist ein engerer Rahmen relativ einfach durchzuführen, kann aber dazu führen, dass bedeutende ökologische Auswirkungen nicht erfasst werden.

Der Endpunkt - das eigentliche Resultat - einer Ökobilanz kumuliert in einem einzigen Wert – dem Eco Point (Pt). **1 Pt steht für 1/1000stel des jährlichen Umwelteintrags (environmental load) eines europäischen Durchschnittsbürgers.** Das klingt recht einfach, ist es aber leider nicht.

Die LCA-Methode zur Erstellung von Ökobilanzen ist entsprechend der DIN ISO 14040 ff normiert und verfolgt sowohl eine Identifizierung als auch Quantifizierung relevanter Einflussparameter auf die Endpunkte „Menschliche Gesundheit“, auf „die Umwelt“ und auf „den Ressourcenverbrauch“ in Produktionsprozessen und Dienstleistung. Zusätzlich kann erhoben werden wie, wodurch und in welchem Umfang vorgelagerte Teilprozesse/Subsysteme eines Herstellungsverfahrens, die eigentliche Nutzungsphase eines Produkts und dessen nachgeschaltete Entsorgung ebenfalls Einfluss auf die drei betrachteten Endpunkte einer Ökobilanz nehmen.

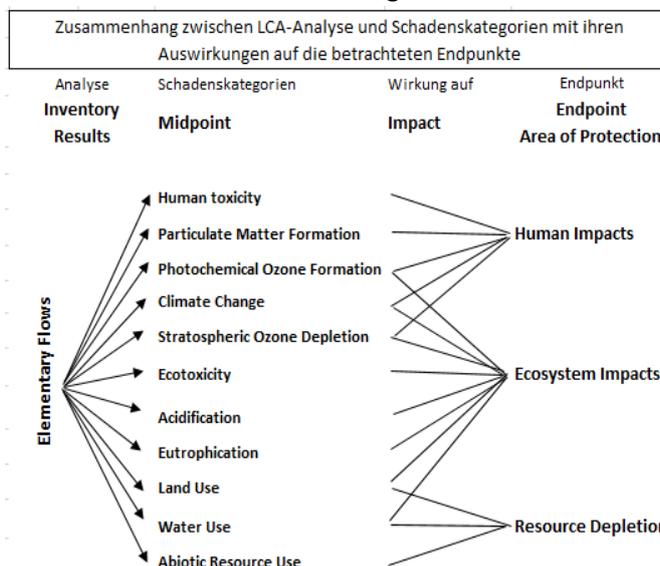
Die Beträge jedes Endpunktes setzen sich aus als Schadenkategorien bezeichneten Subsystem zusammen, die hinsichtlich ihrer Schadwirkungen unterschiedliche Gewichtungen innehaben. Derart komplexe Berechnungen werden mit Hilfe von LCA-Tools wie beispielsweise mit dem hier ausgewählten Programm „SimaPro5“ durchgeführt. SimaPro5 arbeitet mit der als „EcoIndicator 99“ bezeichneten normierten LCA-Methode international vergleichbare Ecopoint-Kennzahlen. Aber nicht nur die Erstellung einer LCA ist komplex und erfordert eine akribische Vorgehensweise, auch die Interpretation der resultierenden Zahlenwerte bedarf der Erläuterung.

Schadenskategorien mit ihren Auswirkungen auf die betrachteten Endpunkte des LCA		
Schaden für die menschliche Gesundheit	Schaden für die Umwelt	Verbrauch von Ressourcen
Human Impacts	Ecosystem Impacts	Resource Depletion
Carcinogens	Toxicity	Freshwater
Toxicity	Solid Waste	Soil
Particulate Matter	Climate Change	Forest
Ozone Depletion	Acid Rain	Grasland
Smog	Eutrophication	Minerals
	Land Use Change	Fossil Fuel

Die drei genannten Einflussgrößen stellen die Endpunkte einer Ökobilanz dar. Sie resultieren aus elf Schadenkategorien, die die relevanten Umweltkompartimente (Boden, Wasser, Luft, Lebewesen,) mit den Schadstoffeinträgen (Stoffe, Strahlung, Lärm) sowie deren Migration in andere Kompartimente betrachten. Mineralische und fossile Ressourcen als auch Flächen- und Wasserbedarfe werden ebenso berücksichtigt wie die Emissionsfracht aller untersuchten Subsysteme.

Tabelle 5: Die 11 Schadenkategorien und ihre Relevanz für die drei Endpunkte einer Ökobilanz.

Die nebenstehende Übersichtsgrafik stellt die Zusammenhänge zwischen den Schadenkategorien und



ihre Relevanz/Zugehörigkeit zu den drei Endpunkten einer Ökobilanz dar.

Schadstoffe und Einflussparameter jeder Schadenkategorie sind messbar. Die Mengen sind durch die Materialangaben, die angewandten Verarbeitungsprozesse, den Energieeinträgen und der prognostizierten Entsorgungsrouten in allen Lebensphasen eines Produkts oder einer Dienstleistung bestimmbar. In Stoffstromanalysen kann dieser Zyklus aufgezeigt, quantifiziert, normalisiert und gewichtet werden.

Abbildung 5: Struktur zu den Zusammenhängen zwischen Schadenkategorien und Endpunkten einer Ökobilanz

Voraussetzung für eine sinnvolle Ergebnisinterpretation und -sicherung ist die Kenntnis über die Zusammenhänge zwischen den in der LCA relevanten Schadenkategorien und dessen Normalisierung und Gewichtung innerhalb der drei betrachteten Endpunkte der Analyse. In Tabelle 6 wurde weiter spezifiziert und zur besseren Übersicht den Schadenkategorien Farben zugewiesen, die sich in der grafischen Auswertung wiederfinden. Nicht aufgeführt sind aus Komplexitätsgründen die Dimensionsangaben.

Setting Impact Categories	Classification & Characterization	Normalization	Grouping	Endpoint Area of Protection
Schadstoffe	wirken auf	fließt ein in Schadenskategorie	Wirkung auf / Impact	Endpunkt
Blei, Cadmium, Nickel, Cobalt	Human toxicity potential	Carcinogens		Human Impacts Ecosystem Impacts Resource Depletion
VOC (volatile organic compounds)		Resp. Organics		
Blei, Cadmium, Arsen, Antimon		Resp. Inorganic		
CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	Global Warming Potential	Climate Change		
UV, Radioaktivität (Lärm)		Radiation		
VOC (volatile organic compounds)	Formation potential of tropospheric ozone photochemical oxidants	Ozone Layer		
FCKW, C ₂ H ₄ , CH ₃ COCH ₃ , H ₂ CO	Depletion potential of the stratospheric ozone layer			
Stäube, Ruß, Partikel	Smog Bildung / Particulate Matter Formation			
Schwermetalle, toxische Mikroschadstoffe	Freshwater aquatic ecotoxicity potential Marine aquatic ecotoxicity potential Terrestrial ecotoxicity potential Abiotic depletion potential for non-fossil resources	Ecotoxicity		
HNO ₂ , HNO ₃ , H ₂ SO ₄ , H ₂ SO ₃ , saurer Regen	Acidification potential of land and water	Acidification		
PO ₄ , NO ₃ aus Gülle, Mist & Dünger	Eutrophication potential	Eutrophication		
Land	Flächenverbrauch	Land Use		
mineralische Rohstoffe, Erze	Ressourcenverbrauch	Minerals		
Mineral Oil, Petroleum	Ressourcenverbrauch	Fossile Fuels		

Abbildung 6: Schadstoffe und Einflussparameter in einer Ökobilanz

In Abbildung 6 sind zum einen die für eine Schadwirkung verantwortlichen Elemente, Stoffe und Strahlungen analytisch messbar. Zum anderen werden alle weiteren Einflussgrößen die Verbräuche von Rohstoffen und Landflächen betreffend detailliert gelistet. Teilweise wirken Schadstoffklassen auf mehr als einen Endpunkt. Beispielsweise beeinträchtigen die klimarelevanten Gase Kohlenstoffdioxid, Methan und Lachgas sowohl die menschliche Gesundheit als auch die Umwelt. Schwermetalle sind für alle Lebewesen toxisch und beeinträchtigen nicht ausschließlich die menschliche Gesundheit. Ein expansiver Flächenverbrauch hat Auswirkungen auf Ökosysteme.

Sind die in einer Ökobilanzierung relevanten Schadenskategorien mit ihren stofflichen Größen identifiziert, erfolgt als Voraussetzung für die Ergebniserstellung eine Normalisierung und Gewichtung innerhalb der drei betrachteten Endpunkte der Analyse. Erst dadurch gelingt eine korrekte und auch standardisierte Subsummierung der Einzelbefunde, die i.d.R. in Tonne, m³ oder DALY (Tagesdosen) angegeben sind, hin zum Endresultat. Werden die Schritte Normalisierung und Gewichtung ignoriert, sind die Mengenangaben der betrachteten funktionellen Einheit innerhalb der Eingangs der Ökobilanz definierten Systemgrenzen nicht korrekt abgebildet.

Der Endpunkt - das eigentliche Resultat - einer Ökobilanz kumuliert in einem einzigen Wert – dem Eco Point (Pt). **1 Pt steht für 1/1000stel des jährlichen Umwelteintrags (environmental load) eines europäischen Durchschnittsbürgers.** Sind die Inhaltsstoffe, deren Mengen, energetischen Bedarfe und erforderlichen Verarbeitungsprozesse zur Herstellung vom Produkten bekannt, kann ein Betrag an Eco-Points dafür ermittelt. Da jeden Bürger in Europa 1.000 Pt pro Jahr zugebilligt werden, liegt es in der Verantwortung eines jeden Einzelnen, durch umsichtigen Konsum und Verbrauch seinen Lebensstil nachhaltig zu gestalten.

F) Ergänzend zum Thema Life-Cycle-Assessment und Ökobilanzierung wurde der **Begriff „Kritische Rohstoffe“** in diese Aufzählung aufgenommen.

Mangelnde Verfügbarkeit induziert Veränderungen. Die Industriestaaten und besonders Europa ist bei vielen vor allem für die Digitalisierung und die Elektromobilität wichtigen Rohstoffen nahezu vollständig von Erzimporten als Primärrohstoffe abhängig. Es fehlen eigene wirtschaftlich erschließbare Quellen. Die Europäische Kommission veröffentlicht hierzu seit 2011 regelmäßig Einschätzungen von nicht-energetischen und nicht-landwirtschaftlichen Ressourcen unter dem Konzept der kritischen Rohstoffe. 2020 wurden erneut 30 aktuell kritische Rohstoffe benannt. Bei ihnen sind das Risiko eines Versorgungsengpasses und dessen Folgen für die Wirtschaft für die EU größer als bei anderen Rohstoffen (EC, 2020).

Grund für Kritikalität	Beispiel	Verwendung
Geringes Vorkommen in der Erdkruste	Platingruppenmetalle	Autokatalysatoren
Schwierige/Kostspielige Gewinnung	Seltene Erden	JEDES elektronische Gerät, Anwendungen für erneuerbare Energien
Gefährlich bei der Gewinnung	Lanthan	Hybridautos, raffiniertes Erdöl
Umweltschädlich bei der Gewinnung	Bauxit(Aluminium)	Bau von Flug- und Fahrzeugen
Gewinnung als Nebenprodukt	Gallium	In Mikrochips verwendete Halbleiter
Versorgungsengpässe und Konfliktbergbau	Cobalt, Phosphatgestein	Lithium-Ionen-Batterien für Elektrofahrzeuge und elektronische Geräte; Herstellung von Düngemitteln
Importabhängigkeit	Naturkautschuk	Wesentlicher Bestandteil von Reifen
Schwieriges Recycling	Scandium	Brennstoffzellen für Elektrofahrzeuge

Tabelle 7: Gründe für die Einstufung als kritischer Rohstoff (in Anlehnung an Europäische Kommission 2020b; Furze & Harrison 2021)

Die Liste der kritischen Rohstoffe wird zu einem zentralen und faktengestützten Element der Politikgestaltung in der EU. Das bedeutet, dass sie bei Verhandlungen von Handelsabkommen sowie bei der Beseitigung von Handelsverzerrungen berücksichtigt wird. Auch der industriepolitische Investitionsbedarf wird auf ihrer Basis ermittelt, um Forschungen und Innovationen zu steuern z.B. mittels EU Förderprogrammen wie Horizont 2020, die Entdeckungen und Anwendungsneuheiten aus den Forschungsbereichen Bergbautechnologie, Substitution und Recycling zur Marktreife verhelfen. Neben der Förderung von nachhaltigen und verantwortungsvollen Beschaffungen sind vor allem Fortschritte in der Kreislaufwirtschaft mit einem qualitativ hochwertigen Recycling und einer Nutzung ohne schädliche Auswirkungen jetzt und zukünftig.

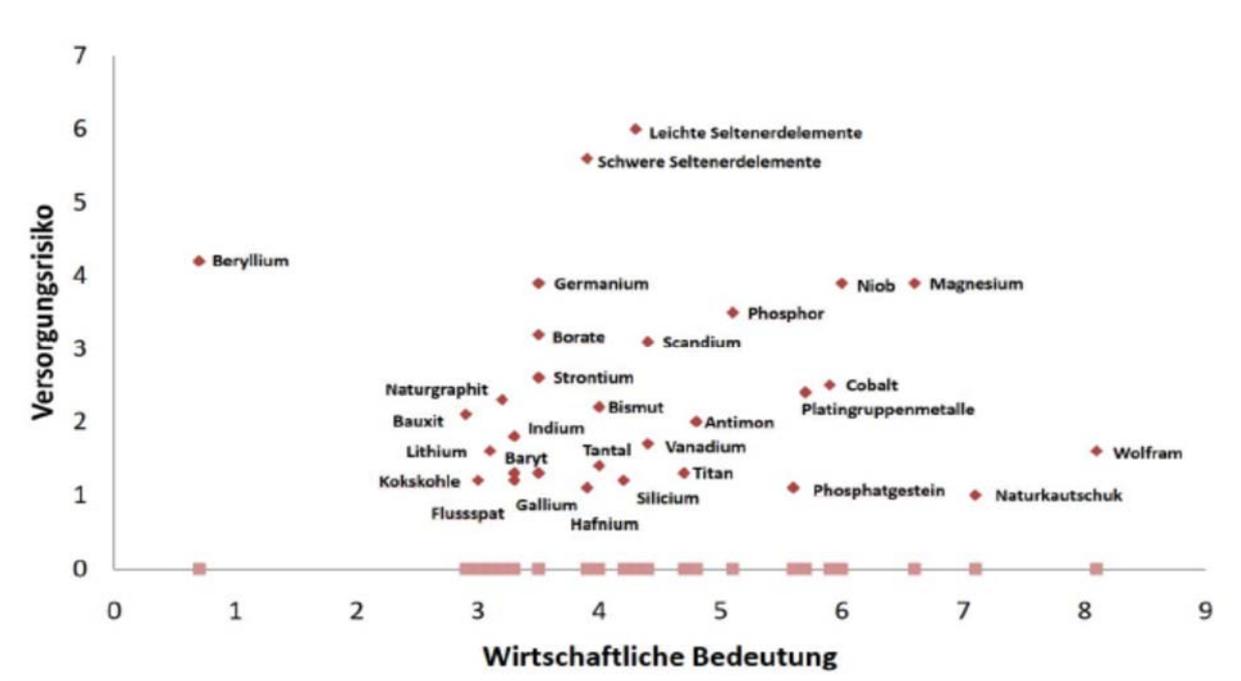


Abbildung 7: Einstufung als kritische Rohstoffe nach EI und SR (in Anlehnung an: Europäische Kommission 2020a, S. 29 auf Basis des US Geological Survey 2022)

Quellen und Literatur

- Statista-Dossier zu Tablets <https://de.statista.com/statistik/studie/id/6247/dokument/tablets-statista-dossier/> abgerufen 26.7.2021
- EU kritische Rohstoffe CELEX 52020DC0474 DE TXT - <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474> abgerufen 26.7.2021
- Hohmann, M. (2018) Statista study_id64582_rohstoffe-fuer-schluesselformen unter www.statista.com abgerufen 1.3.2022
- U.S. Geological Survey, 2022, Mineral commodity summaries 2022: U.S. Geological Survey, Reston, Virginia: 2022; 202 p., ISBN 978-1-4113-4434-1 <https://doi.org/10.3133/mcs2022>. abgerufen 1.3.2022
- EuroGeoSurvey (EGS) and the Mineral Resources Expert Group; Cassard, D. et al. (2015) A Note on the map of Critical Raw Material deposits of Europe. Version. 3, Brussel, https://www.eurogeosurveys.org/wp-content/uploads/2016/04/CRM-MAP-FINAL_HQ-F.pdf abgerufen 1.3.2022
- Bütow, J.C. (2022) Eine digitale Lernumgebung zu kritischen Rohstoffen im Chemieunterricht, Master-Thesis, Universität Bremen

3.3. Bewertungstools und Datenbanken

Bewertungsverfahren zur Endpunktbestimmung und besonders kompletter Ökobilanzierungen sollen nachvollziehbar, einfach umsetzbar und nach einer vollständig übertragbaren d.h. normierten Methode arbeiten. Bei den in diesem Projekt betrachteten Endpunkten handelt es sich um zwei Wirkungsanalysen (Eco Indicator 99, CO₂-Bilanz) und zwei Sachbilanzen (virtuelles Wasser, kumulierter Energieaufwand). Sie sind nicht monetär und eindimensional, d.h. sie liefern ein Ergebnis. Mit Ausnahme der CO₂-Bilanz umfassen die Betrachtungen die gesamte Lebensspanne „from cradle-to-grave“ und die Bewertungsgrößen schließen Stoff- und Energieströme im weitesten Sinne ein. Zusätzlich wurde der Indikator „Flächenverbrauch“ ausgewählt, um für die Agrargüter einen nachvollziehbareren Bezug zu Anbaubedingungen und zur Produktionsmenge in verschiedenen Ländern für die jüngeren Zielgruppen nachvollziehbar gestalten zu können.

Ein Ansatz zur Beschreibung von Stoffsystemen sind sogenannte Fließbilder (flow sheets), wie sie in der Verfahrenstechnik zur Darstellung stofflicher und energetischer Flüsse verwendet werden. Fließbilder können Prozesse oder Anlagen sowohl qualitativ als auch quantitativ beschreiben. Ein Beispiel für ein qualitativ-quantitativ beschreibendes Fließbild sind die sogenannten Sankey-Diagramme, bei denen die Pfeilbreite der Stoffflüsse deren Quantität entspricht. Sowohl Stoff- und Energiebilanzen, als auch Fließbilder sind rein deskriptive Modelle von Stoffstromsystemen. Sie sind jedoch die Grundlage einer systematischen Bewertung der Effizienz der Stoffnutzung (Cleaner Production). In Zusammenarbeit mit dem Fachbereich 01 Mathematik/Informatik an der Bremer Universität wurde von Herrn Dipl.-Inf. Bernhard Berger ein Software-Tool entwickelt, das eine vereinfachte LCA-Analyse auf Sankey-Basis erlaubte. Die Grundlage dazu bildete ein iOS-basiertes Software-Tool zur Erstellung von Sankey-Diagrammen, das im Rahmen einer Masterarbeit zur „Konzeption und Entwicklung einer Lernsoftware für chemische Prozesse“ von Herrn Tobias Bönisch im ebenfalls von der DBU geförderten Vorhabens zur „Phosphor-Rückgewinnung“ konzipiert wurde. Das Tool wurde von der damals genutzten App der Firma squishLogic entkoppelt und läuft Plattform-unabhängig.

Die umfangreichste und zudem kostenlose! Datenbank für Agrargüter und Landwirtschaft weltweit bietet FAOSTAT der Food and Agriculture Organization der Vereinten Nationen. In den vergangenen fast drei Jahrzehnten wurde eine gigantische Datensammlung erstellt, in der mit nur wenigen Mouse Clicks die Extraktion von Informationen zu ganz bestimmten Produkten in ausgesuchten Ländern in einem bestimmten Jahr möglich ist. Das Angebot von FAOSTAT wird permanent aktualisiert und durch immer spezifischere Features und Subdatenbanken (z.B. zu Dünger, Pestiziden, Emissionen, Wasserversorgung, Bodenbeschaffenheit u.v.m.) ergänzt. So können beispielsweise die Wasserbedarfe ausgewählter Agrarprodukte, die allerdings vorab auf Agrar-Plattformen wie bspw. ProPlanta recherchiert werden müssen, mit den Ernteerträgen des jeweiligen Erzeugerlandes aus FAOSTAT in Zusammenhang gebracht werden. Die im jeweiligen Erzeugerland herrschenden klimatischen Bedingungen können wiederum in der ebenfalls unter FAOSTAT beheimateten Subdatenbank zu Wasserverbrauchen (AQUASTAT) nachgesehen werden. Dort sind sämtliche Wasserressourcen und Wasserströme nach Verwendung aufgeschlüsselt, extrahierbar daraus sind die Bedarfe nach Sorten von Ackerfrüchten aber nicht. Ähnlich kann bei der Ermittlung von Flächenverbrauchen verfahren werden. Via FAOSTAT sind die zur Agrarproduktion nutzbaren Flächen der Länder dokumentiert, auch die erwirtschafteten Erträge (angegeben als Yield in hg pro ha) ist nach

Feldfrüchten, Land und Jahr separiert aufgeschlüsselt. Das ist gigantisch! Für die entwickelten Angebote mussten die offerierten Daten sinnvoll kombiniert, reduziert und harmonisiert werden.

Für technische Verfahren, Produkte und Produktionsverfahren, Energiebedarfe sowie Verwertungs- und Recyclingverfahren wurden zahlreiche z.T. sehr branchenspezialisierte Datenbanken entwickelt. Die Anwendung auf Gebiete innerhalb von sehr komplexen und noch neuen Wissenschaften wie der Biotechnologie sind bisher zwar noch eingeschränkt möglich, werden sicherlich in den kommenden Jahren auch dahingehend komplettiert werden. Die Schweizer Datenbank „Ecoinvent“ und die US LCI Datenbank (thinkstep GaBi) sind als die beiden wichtigsten Anbieter bilanzrelevanter Technologie-Daten. Die branchenspezifischen Subdatenbanken, allen voran die energetischen Daten, werden laufend erweitert bzw. aktualisiert.

LCA hat sich im Verlauf der vergangenen 25 Jahre zu einer eigenständigen Disziplin entwickelt, die aus der Forschungscommunity ihren Weg in die Gesetzgebung gefunden hat und mittlerweile in der Wirtschaft angekommen ist. Dieses neue Berufsfeld erfordert Gründlichkeit, Beherrschung der von Fachausdrücken und besonders Abkürzungen gespickten Terminologie, Abstraktionsvermögen und Interdisziplinarität auf hohem Niveau. Die Tragweite von LCA mit ihrem Potenzial zur Optimierung von Produktionsverfahren selbst als auch den vor- wie nachgeschalteten Produktionsprozessen war zunächst in der pharmazeutischen und chemischen Industrie als auch den (hoch)technologischen Produktionszweigen erforderlich. Nachfolgend nutzten zunehmend Dienstleistungssektoren wie bspw. Logistiker, Unternehmensberatungen, Banken und Versicherungen LCA als Instrumente zur Optimierung und Leistungsbemessung der monetären und nicht monetären Performance. Es ist ein prosperierender Markt. Da die Datenermittlungen schwierig, zeit- und kostenintensiv sind und in vielen Unternehmen dafür keine firmeneigenen Experten zur Verfügung stehen, ist die Auslagerung von LCA-Tätigkeiten hin zu Dienstleitern opportun.

Genau hier liegt der Vorteil geeigneter Software-Tools. Mit ihrer Hilfe gelingt es, statische Prozessmodellierung auf Basis der Abbildung von Abhängigkeitsverhältnissen zwischen den Input-, Output- und Bestandsgrößen sowie über die Transformationsprozesse durchzuführen. Durch Lösung linearer Gleichungssysteme lassen sich so aus wenigen, empirisch erhobenen Stoffströmen alle anderen Ströme mit linearer Abhängigkeit berechnen. Denn in vielen realen Produktionsprozessen treten jedoch auch nichtlineare Abhängigkeiten auf und es ist oftmals nicht möglich, alle erforderlichen Daten zu erhalten. Sie müssen zum Teil geschätzt werden. Dies limitiert die Genauigkeit der ermittelten Ergebnisse und es müssen bei der Betrachtung für eine Ökobilanz des gesamten Lebenszyklus eines Produkts daher Abstriche gemacht werden.

In den folgenden zwei Tabellen sind die wichtigsten kostenfreien (Tabelle 8) und kostenpflichtigen (Tabelle 9) Infoportale, Datenbanken und Software-Tools aufgeführt, die für die Entwicklung von LCA-Angeboten genutzt wurden. Ferner wurden für die Agrarprodukte FAOSTAT und das World Food Database noch Agri-Portale von SALCA, MEXALCA, Bioenergie-Ökoinventare, ProPlanta verwendet. Die zusammenfassende Publikation von Poore und Nemecek zur Ökobilanzierung ausgewählter Lebensmittel war ebenfalls informativ und hilfreich. Wasserdaten wurden über die Portale „TheWaterNetwork.com“ und „Waterfootprint.org“ bezogen. Als Energieportale wurden entega.de, e-genius.at, Destatis und Statista herangezogen.

Tabelle 8: Übersicht freier Datenbanken und Infoportale (open source)

 <p>Global Footprint Network Advancing the Science of Sustainability</p>	<p>ECOLOGICAL FOOTPRINT AND BIOCAPACITY, 2007</p>	<p>Results from National Footprint Accounts 2010 edition, <u>www.footprintnetwork.org</u>. Extracted on October 13, 2010</p>
 <p>Food and Agriculture Organization of the United Nations</p> <p>http://www.fao.org/faostat/en/#home http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/en/</p>	<p>FAOSTAT</p> <p>Sichtet und klassifiziert seit 40 Jahren weltweit Produkte der Länder aus Landwirtschaft, Forst & Fischerei, Lageberichte zu Hunger, Migration, Biodiversität</p>	<p>http://www.fao.org/home/digital-reports/en/</p> <p>Seit 3 Jahren (ab 2017) gibt es digitale Reporte</p> 
	<p>ProBas</p> <p>http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php 8.000 Datensätze können genutzt werden Allerdings letztes relaunch 2013!</p>	<p>Prozesskategorien Energie, Materialien & Produkte, Transport, Entsorgung, Sonstige Dienstleistungen</p>
 <p>IINAS Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien</p>	<p>GEMIS Ökoinstitut, Darmstadt</p> <p>Koop mit ProBas http://iinas.org/downloads-de.html</p>	<p>Prozesskategorien Energie, Landnutzung, Biomasse, Ressourceneffizienz</p>
<p>www.lasinfo.eu</p> <p>About us What is LAS LAS in our Lives</p>	<p>ECOSOL der CEFIC</p> <p>http://www.lasinfo.eu/index.php/life-cycle-inventory</p>	<p>LCA für Tenside und LAS = LöMi auf Basis linearer Alkylbenzol-Sulfonate</p>
 <p>Schweizerische Eidgenossenschaft Confédération suisse Confederazione Svizzera Confederaziun svizra</p>	<p>BAFU Bundesamt für Umwelt & ETH Zürich (CH)</p> <p>https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wirtschaft-konsum/fachinformationen/methodische-grundlagen-von-oekobilanzen.html</p>	<p>Gute Einführung in den Lebensmittelvergleich schöne Bsp. sehr gut aufbereitet</p>
 <p>ESU-services fair consulting in sustainability</p>	<p>Dr. Niels Jungblut & Mitarbeiter</p>	<p>http://esu-services.ch/publications/methodology/</p>

Table 9: Übersicht kommerzieller Datenbanken und Infoportale

 <p>National Institute for Public Health and the Environment Ministry of Health, Welfare and Sport</p>	<p>ReCiPe (NL)</p> <p>RIVM Committed to <i>health and sustainability</i> https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe</p>	<p>ReCiPe is a method for the impact assessment (LCIA) in a LCA.</p> <p>Life cycle impact assessment (LCIA) translates emissions and resource extractions into a limited number of environmental impact scores by means of so-called characterisation factors.</p>
 <p>FEFCO Corrugated Packaging</p>	<p>FEFCO, GO, ECO</p> <p>http://www.fefco.org/lca</p>	<p>European Database for Corrugated Board Life Cycle Studies</p> <p>Schwerpunkt Papier & Kartonagen</p>
 <p>ifu hamburg Member of iPoint Group</p>	<p>Umberto (DE)</p> <p>https://www.ifu.com/umberto/</p>	<p>Material- und Energieeffizienz steigern Carbon Footprints berechnen Ökobilanzen erstellen Ökoeffizienz erreichen</p>
 <p>SimaPro</p>	<p>Sima Pro (NL)</p> <p>Software tools und Datenpakete; Trainings & Teacher/docent tools https://simapro.com/education/</p>	<p>The educational SimaPro versions have almost the same functionality as the business versions. They come with extensive inventory databases, such as ecoinvent, and a range of impact assessment methods, such as ReCiPe. The software supports twelve different languages. This makes it even easier for your students to learn how to do LCAs.</p>
 <p>thinkstep</p>	<p>GaBi</p> <p>https://www.gabi-software.com/deutsch/index/</p>	<p>LCA Software für Ökobilanzen & CO2-Fußabdruck Wasserfußabdruck, Ökodesign, EPD und PEF, Ressourcen- & Energieeffizienz Kostenloser 30 Tage Test</p>
 <p>ecoinvent Database</p> <p>Wichtigste Datenbank!</p>	<p>Ecoinvent (CH) https://www.ecoinvent.org/</p> <p>mit Info zu Produktionsdaten, Liefermengen, Energiebedarfe uvm. Wird von allen anderen LCA-Datenbanken genutzt!</p>	<p><i>ecoinvent version 3.5 in your Software. Guest user</i></p> <p>ecoinvent version 3.5 is available in Air.e LCA, Gabi, openLCA, REGIS, Umberto and SimaPro.</p>

Grundlage für eine valide Datenauswahl ist immer eine möglichst detaillierte Prozessbeschreibung. Führend ist dabei die von den Schweizern vertriebene kommerzielle Datenbank und Software „ecoinvent“, die den größten und verlässlichsten Datenpool (gültig für die Schweiz und Europa) zu Materialien, landwirtschaftlichen Prozessen, Konstruktionselementen und Chemikalien zusammengetragen hat. Auch besonders mühsam erhältliche Angaben zu industriellen Produktionsabläufen, die entweder von den Firmen aus Geheimhaltungsgründen nicht weitergegeben werden oder aber oftmals schlicht fehlen, sind über ecoinvent verfügbar. Alle anderen Datenbanken bedienen sich daher aus ecoinvent, grenzen sich jedoch durch Spezialisierungen hinsichtlich der Auswahl ihrer Endpunkte voneinander ab. Das USLCI bildet mit thinkstep GABI das amerikanische Pendant. Als weitere wichtige Datenbank liefert wie bereits erwähnt FAOSTAT die Agrardaten.

Auf der Suche nach einer geeigneten Software/Datenbank für die Anwendung von LCA in Studienseminaren fiel die Wahl auf SimaPro5. Nach Testläufen verschiedener Anwendertools für LCA-Analysen bietet SimaPro5 folgende Vorteile: Im Datentool sind alle derzeit wichtigen Inventory-Datenbanken inkludiert. Diese werden jährlich aktualisiert. Die Darstellung des Prozessnetzwerkes („Baum“) mit den Stoffströmen ist als Sankey-Diagramm mit allen Subsystemen möglich. Die Auswertungsmethode ist DIN ISO 14040-14044/2006 konform und wird als „Eco-Indicator 99“ bezeichnet. Die Methode ist international anerkannt, in Publikationen umfangreich belegt und die Vor- sowie Nachteile diskutiert. Der besondere Vorteil des „Eco-Indicator 99“ ist in der zusätzlichen Normalisation und Gewichtung zu sehen, die nach DIN 14040/44 nicht vorgeschrieben ist. Diese Generalisierung liefert Ökobilanzierungsergebnisse mit einer relativ geringen Unsicherheit, sind demnach noch am ehesten als verbindlich anzusehen.

Die LCAs sind so konzipiert, dass sie mit **der Demo-Version des LCA-Tools SimaPro5** durchgeführt werden können. Das Software-Tool „SimaPro5“ bietet in einer Demo-Variante einen reduzierten Datenbankzugriff für 30 Tage, mit dem Ökobilanzierungen von Produktionsprozessen nachvollzogen werden können. Jedoch wird nach Ablauf der 30 Tagefrist der weitere Datenbankzugriff nicht verweigert. Es besteht die Option zur Vernetzung von bis zu 40 Teilnehmern, die bis zu 15 LCA kostenfrei durchführen können. Erforderlich ist eine Anmeldung auf der Website von SimaPro5 und nach Freischaltung der Download der Datenbank mit Installation. Die Software ist Windows basiert und mittels Installation einer virtuellen Box oder via Office 365 auch für iOS nutzbar. Eine Lizenz der für den Bereich „Education“ offerierten Classroom-Version kostet aktuell 6.600 EURO im Jahresabonnement. Ab Frühsommer 2022 wird eine online-Variante angeboten, mit der Browserunabhängig gearbeitet werden kann. Der Preis beträgt 3.600 EURO.

Weitere Informations- und Literaturquellen zum sind die Journals zum Thema Life Cycle Assessment. Sie haben Impact Faktoren zwischen 3,5 und 11. Für Int.J.LCA sind in 2021 ca. 1Mio. downloads notiert.

- ***Integrated Environmental Assessment and Management*** (IEAM), WILEY & SETAC
<https://setac.onlinelibrary.wiley.com/journal/15513793>
- ***The International Journal of Life Cycle Assessment*** (Int J Life Cycle Assess), SPRINGER
<https://www.springer.com/environment/journal/11367>
- ***The Journal of Industrial Ecology***, MIT-Press @ WILEY
<https://onlinelibrary.wiley.com/journal/15309290#pane-01cbe741-499a-4611-874e-1061f1f4679e01>
- ***Journal of Cleaner Production***, ELSEVIER
<https://www.journals.elsevier.com/journal-of-cleaner-production>
- ***Journal of Environmental Chemical Engineering***, ELSEVIER
<https://www.journals.elsevier.com/journal-of-environmental-chemical-engineering>
- ***Resources, Conservation and Recycling***, ELSEVIER <https://www.journals.elsevier.com/resources-conservation-and-recycling>

3.4. Konzeption der Vorhabeninhalte für Schule, Universität und Ausbildung

3.4.1. Anwendungsbeispiele didaktisch rekonstruiert und zielgruppengerecht aufbereitet

Geeignete Sach- bzw. Stoffbeispiele sollen aus dem alltäglichen Lebensumfeld der SuS, Azubis und Studierenden kommen, in den Partnerländern vergleichbare Interessenswerte innehaben und dort ebenfalls verfügbar sein. Die gewählten Beispiele umfassen drei Anforderungsniveaus - einfach, moderat, komplex. Aus den Bereichen Lebensmittel, Gebrauchsgüter und Energieträger finden sich hierzu Beispiele, die sowohl im Rahmen theoretischer LCA-Betrachtungen Zielgruppen gerecht aufbereitet werden können und sich partiell für eine praktische Laborbearbeitung eignen.

Die LCA-Betrachtungen werden mit kleinen physikalischen Messreihen (z.B. Erfassung von Durchflussraten, Temperatur, Stromverbrauch, Wärmebildern etc.) ergänzt, um die teilweise doch sehr trockene Datensuche und -auswahl für die Teilnehmer nachvollziehbar und verständlich aufzubereiten. Für fortgeschrittene Teilnehmer sollen praktische Laborübungen das Angebot bereichern, da Ökobilanzierungen auch Herstellungsprozesse von Produkten beinhalten, die idealerweise bzw. zunehmend den Maximen einer grünen Chemie entlehnt sein sollten.

Als methodische Arbeitshilfe soll es Lernenden/Studierenden anhand vorgefertigter Bewertungsleitfäden möglich sein, Schritt für Schritt aus verschiedenen Datenbanken die für die Bewertung relevanten Daten ihres gewählten Produkts mit definiertem Bilanz-Endpunkt zusammen zu stellen. Die „LCA/Ökobilanzierung“ greift die aktuell sechs wichtigsten Bewertungsmethoden auf: Treibhausgasbilanz (CO₂-Fußabdruck), Flächenverbrauch, kumulierter Energieaufwand, und virtuelles Wasser. Anstelle der im Antrag aufgeführten UBA-Wirkungsindikatoren und die Umweltbelastungspunkte (UBPs) wurde die ähnlich komplexe jedoch mit dem Software-Tool SimaPro5 durchführbare Ökobilanzierung nach der Methode „Eco Indicator 99“ ausgewählt.

Die Lernmaterialien und Schülerlaborangebote sollten von Beginn an in einem internationalen Konsortium unter der Leitung der Universität Bremen (Institut für Didaktik der Naturwissenschaften, AG Prof. Dr. I. Eilks) mit Partnern aus Brasilien (Federal University Sao Carlos, AG Prof. Dr. Vania G. Zuin) und den USA (University of California Davis, AG Prof. Dr. Ozcan Gulacar) entwickelt werden. Prof. Zuin ist sowohl chemische Analytikerin als auch Didaktikerin mit Schwerpunkt in der „grünen Chemie“ und befasst sich mit aktuellen Problemen in der Landwirtschaft Brasiliens. Mittlerweile lebt Prof. Zuin in Lüneburg.

Die technisch-praktisch arbeitenden Forschungsinstitutionen in Sao Carlos und Bremen lieferten die labortechnischen Grundlagen zum synthetischen Anteil dieses Angebots mit gezielten Modifikationen und die Charakterisierung ausgewählter Modellsubstanzen. Ferner unterstützte Prof. Zuin bei der Entwicklung des Moduls „Orangensaft“. Die Didaktiker befassten sich mit der Entwicklung intelligenter und innovativer Methoden zur Wissensvermittlung komplexer und vernetzter Systeme.

Prof. Gulacar ist als chemischer Didaktiker ebenso wie die Arbeitsgruppen in Sao Carlos und in Bremen für die grundständige chemische Lehre und Ausbildung naturwissenschaftlicher Studierender maßgeblich verantwortlich und in der Bildung für nachhaltige Entwicklung international ausgewiesen.

Der Zusammenschluss weiterer nationaler und internationaler Partner wurde in diesem Vorhaben als wesentlich angesehen.

Tabelle 10: Nationale und internationale Partner

Name	Institution	Arbeitsgebiet
Prof. Dr. Dr. Vania G. Zuin	Federal University of Sao Carlos, Brasilien	
Prof. Dr. Ozcan Gulacar	University of California Davis, USA	
Prof. Dr. Jorg Thöming	Universität Bremen	Wertstoffrückgewinnung, Katalyse
Prof. Dr. Anne Staubitz	Universität Bremen	Synthese Anorganik, Katalyse
Prof. Dr. Dr. Rolf Hempelmann	Universität des Saarlandes	Synthese, Katalyse
Prof. Dr. J. Huwer	Universität Konstanz	Didaktik, Digitalisierung
Prof. Dr. Ralf Gläbe	Hochschule Bremen	Werkstofftechnik
Prof. Dr. Juliane Filser	Universität Bremen	Ökologie
Prof. Dr. Imke Lang	Hochschule Bremerhaven	Marine NaWaRo / Mikro-Algen
Prof. Dr. Christian Wild	Universität Bremen	Meereschemie / Korallen
Dr. Kirsten Fahl	AWI Bremerhaven	Meereschemie / Analytik
Dr. Marianne Matzke	ECHA Helsinki, Finnland	Recht, REACH
Kerttu Valtanen	UBA Berlin	Risikobewertung, REACH
Dr. Jan Köser	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe BGR, Hannover	Kritische Rohstoffe, mineralische Ressourcen
Dr. Bernhard Berger	Hochschule Hamburg Harburg	Informatik
Christoph Bernatzky, Jörg Oppermann	hanseWasser Bremen GmbH	Wasser / Abwasser
	Nehlsen	
Isabell Winkler	BEW, Essen	
Petra Wlodzka	Dortmund	Lehrkräfte der naturwissenschaftlichen Fachrichtungen
Dr. Nicole Wolf	Universität Würzburg	Chemiedidaktik

3.4.2. Harmonisierung des Materials und didaktische Reduktion für einen Einsatz in Schulen

Die Arbeit mit Studierenden der technischen Fachrichtungen gelang nach einer Einführung in das Thema LCA mit ihren Zielen, benötigten Prozessdaten, Energiequellen und Hilfen/Anleitung zur Ergebnisinterpretation recht zügig. Es konnten zwei Gruppen mit zunächst 3 später 6 Doktoranden als Testgruppe gewonnen werden. Die Installation des Software-Tools gelang innerhalb von 5 Minuten. Zur Orientierung wurde ein einführendes online-Tutorial abgehalten, um Sinn und Ziel von LCA zu erläutern und die Features mit der Ordnersystematik und ihren Inhalten vorzustellen. In Partnerarbeit wurden die Themen Metalle (Aluminium, Lithium) sowie die Katalyse von Methanol bearbeitet. Die Studierenden sind im Umgang mit grafischen Auswerteprogrammen (und sehr kleinen Zahlen) vertraut, die erste Ergebniserstellung gelang schnell. Die Interpretation der Ökobilanz gelang in Diskussionen und mit Hilfe der Interpretationshilfe, die sich am Beispiel des Aluminiums orientiert. In

einer zweiten Simulationsrunde variierten die Studierenden ihre Prozessparameter und stellten die erzielten Ergebnisse denen der ersten Simulation gegenüber. Recht schnell entwickelten sich daraus Iterationsprozesse und belegte den prospektiven Einsatz der LCA als Steuerungselement für nachhaltige Synthesen.

Nach 2 Stunden zogen die Teilnehmer ein positives Fazit: Das Interesse für LCA war geweckt, die Relevanz des Umweltaspekts bei der Entwicklung neuer Synthesetechniken und Recyclingmethoden stand außer Frage. Das Software-Tool in der reduzierten DEMO-Variante war nach einer Einführungs- und Trainingsphase von den Teilnehmern beherrschbar. Es konnte ihnen hilfreiche Informationen zur Gestaltung chemischer Prozesse liefern, da Variationen in der Energiezusammensetzung, der Menge des Katalysators oder Extraktionsmittels und Ergänzung weiterer Prozess-/Arbeitsschritte unmittelbaren Einfluss auf die Beträge nach Schadenskategorien der Ökobilanz auswiesen. Natürlich konnten mit SimaPro5 nicht die programmierten Prozesssimulationen der Ingenieure 1zu1 abgebildet werden, wohl aber wurde den Doktoranden bewusst, durch welche Prozessparameter die Einflussnahme auf die Umwelt verstärkt oder aber auch vermindert werden kann. Die Doktoranden griffen auch später noch auf die Ökobilanzierung zurück, um die Auswirkungen neuer von ihnen entwickelten Prozessführungen auf die Umwelt abzufragen. Die Demo-Variante war immer noch aktiv. Bedauert wurden die hohen Kosten für eine sogar noch zeitlich begrenzte Lizenz.

Ähnlich verhielt es sich mit Studierenden des Lehramts der naturwissenschaftlichen Fächer. In zwei Gruppen zu je 15 Studierenden und in zwei Kleingruppen mit jeweils 5 Studierenden wurden die für den schulischen Unterricht aufbereiteten Materialien vorgestellt und auf ihr Anwendungspotenziale hin untersucht. Ähnlich wie bereits bei der Doktorandengruppe beschrieben, bestand seitens der Studierenden ein großes Interesse am Thema LCA mit seinen vielschichtigen Endpunkt Betrachtungen. Die Relevanz und Aktualität wurde vor dem Hintergrund der für die Schülerschaft aktuell sehr wichtigen Themen Klimawandel und Verlust der Biodiversität als hoch eingeschätzt. Betrachtet wurden von den angehenden Lehrämtern die Materialien zur „Kuhmilch und pflanzlichen Alternativen“ und zum „Metall Aluminium“. Ergänzt wurden die beiden Angebote mit kleinen Praxisanteilen – der Herstellung von Hafer-Drink in zweierlei Varianten mit anschließender Verkostung und der Demontage eines iPads mit Gewichtsbestimmung des Alu-Anteils.

Es gab viele strukturelle und inhaltliche Änderungsvorschläge, die die Einbindung sowohl in den schulischen Unterricht als auch universitären Seminarablauf erheblich verbessern würden. Um den maximalen Stundenumfang für non-curriculare Unterrichtsinhalte von 2 Doppelstunden nicht zu sprengen, waren erhebliche Vereinfachungen sowohl im Materialumfang, der Datenbereitstellung und der Ergebnissicherung notwendig. Ferner sollte mit Hilfe gezielter Aufgaben durch die Thematik geleitet werden. Grundkenntnisse in numerischer Datenverarbeitung können nicht vorausgesetzt werden. Um diese zu vermitteln, muss zusätzliche Zeit einkalkuliert werden.

In der untenstehenden Zusammenfassung Tabelle 11 sind die Stellungnahmen der Studierenden aufgelistet. Die „positive“ Seite belegt das generelle Interesse und die Notwendigkeit, dieses Thema im Verbund mit dem Begriff „Nachhaltigkeit“ auch interdisziplinär im schulischen Unterricht zu verankern. Die Möglichkeit zur Anwendung vielfältiger didaktischer Methoden sowie die Option zur Binnendifferenzierung wurde sehr begrüßt. Neben den Umweltaspekten können/sollten auch sozio-ökonomische Aspekte betrachtet und diskutiert werden.

Tabelle 11: Lob/Kritikpunkte/Änderungsvorschläge

positiv	negativ
+ Zusammenhänge zwischen Produktion und Konsum wird deutlich	- Einstieg in das Thema mit Unterlagen verbessern
+ brandaktuell und interdisziplinär	- zu viele neue Begriffe müssen erlernt werden
+ fördert Gruppenarbeit	- auch die „einfachen“ LCA sind noch zu komplex
+ lässt Binnendifferenzierung zu	- Fokus auf 1 Produkt – mehr Angebote gewünscht
+ Bandbreite didaktischer Methodik ist groß	- SuS sind mit Datenkolonnen überfordert, die Bedienung von Excel/Numbers ist kaum bekannt
+ Padlets wären hier sehr gut geeignet	- Eigenes Handlungspotential fehlt – formulieren!

3.4.3. Implementierung der Materialien in Schulen

In Zusammenarbeit mit den beiden erfahrenen Lehrkräften Frau Dr. Nicole Garner, OS Rockwinkel, und Frau Anke Schnibbe, IGS Osterholz-Scharmbeck, wurden die LCA-Entwürfe auf ihr Einsatzpotenzial für den schulischen Unterricht hin evaluiert. Ihre Vorschläge und Anmerkungen führten zur Erarbeitung einer Grobstruktur und den daraus erstellten Unterlagen und mündeten in ein nutzbares Template eines generellen Verlaufsplans mit einem Zeitrahmen von 2-4 Doppelstunden.

Je komplexer die betrachteten Produkte waren oder die Anzahl der zu vergleichenden Produkte zunahm, desto wichtiger war die Aufbereitung der zur Verfügung gestellten Datensätze. Da nicht mehr als 4 Arbeitsblätter zu bearbeiten sein sollten, mussten die von den SuS bzw. jüngeren Studierenden und Auszubildenden zu verarbeiteten Datensätze reduziert zusammengefasst werden. Maximal fünf Parameter (z.B. Ertrag in kg und Währung; Flächenverbrauch, Wasserbedarf und GHG) sollten zur Diskussion stehen. Es ergaben sich dadurch Variationsmöglichkeiten, die - je nach Auswahl der Parameter - für die fokussierten Endpunkte ausreichend Diskussionsgrundlagen lieferten. Die Ökobilanzierung in der DEMO-Variante liefert hier generelle Erkenntnisse zu den Produkten und ist je nach Agrarprodukt nur mit wenigen Datensätzen ausgestattet.

Die verbesserte und gestraffte Gliederung umfasste die Arbeitsschritte Einstieg, Praxis, Gruppenarbeit, Präsentation der Ergebnisse und Diskussion. Die Unterlagen sollten modular so aufgebaut sein, dass nach 2 Doppelstunden die wesentlichen Inhalte vermittelt und der Exkurs beendet werden kann. Zugleich sollte Erweiterungsmaterial mit Praxisanteilen offeriert werden, um im Rahmen bspw. einer Projektwoche an einem Vormittag bzw. ganztägig das Thema zu vertiefen.

- **Einstieg:** 1-2 Forschungsfragen leiten ein, Meinungsumfrage ermöglicht SuS zu erkennen ob und wie weit das Thema für sie selbst relevant ist; Padlet/Kurzfilme/Videoclips bieten erste Informationen
- **Praxis:** Verkostung, Laborexperimente, Visualisierung/Eigenproduktion (Poster, Filme, Podcasts etc.)
- **Gruppenarbeit:** Recherche und Faktencheck, MindMap, Kriterien für Umfragen/Meinungsbilder festlegen, SCHWERPUNKT ist die Datenanalyse mit Hilfe von Excel oder Numbers (Durchdringung und Visualisierung der relevanten Zahlen, richtige und aussagekräftige Bezüge herausfiltern)
- **Präsentation der Ergebnisse:** Keynote, Powerpoint, Padlet, Poster
- **Diskussion:** als Gruppenpuzzle / Podiumsdiskussion / Expertenrunde zur Sicherung der Ergebnisse.

Die Strategien zur didaktischen Reduktion der entwickelten Materialien wurden umgesetzt und in ein LCA-Grundgerüst eingebettet. Am Beispiel landwirtschaftlicher Produkte ist in umseitiger Tabelle 12 eine Übersicht über die zu verknüpfenden LCA-Arbeitsstadien mit ihren Inhalten dargestellt.

Tabelle 12: Arbeitspakete für landwirtschaftliche Produkte als Vorschlag eines Unterrichtsverlaufs

LCA-Arbeitsstadium	Inhalt / Hilfsmittel
1	Produktionsländer Weltkarte zur Orientierung
	Allgemeine Info Gegenüberstellung der Landfläche zur landwirtschaftlich nutzbaren Fläche, landwirtschaftlicher Ertrag je Produkt gesamt
2	Produkt (Holz, Getreide, Milch, Orangen, Aquakulturen, Soja, Kartoffeln, Rindfleisch)
	Produktions- bzw. Anbaubedingungen, Flächen- & Wasserbedarf , Hilfsmittel (Dünger, Pflanzenschutz), geologische & klimatische Bedingungen im Erzeugerland je Produkt, Energiebedarf
	Gegenüberstellung der Landfläche zur landwirtschaftlich nutzbaren Fläche, landwirtschaftlicher Ertrag je Produkt und Erzeugerland
	Stoffstromanalyse: Auflistung der Arbeitsschritte im Detail, <i>Sankey-Tool via SimaPro5, ecoinvent oder umberto</i>
3	Normierung Produktionsdaten 2019 + 2020 [Einheit ha, kg/ha] <i>Faostat, Proplanta, UBA</i>
	Allgemeine Info Import- & Export: Anteil des Erzeugers am Welthandel je Produkt <i>Statista</i>
4	Flächenbedarf/-verbrauch <i>Faostat</i> ;
	CO₂-Äquivalente <i>SimaPro5, ecoinvent</i> ;
	Wasserbedarf <i>Faostat, Statista, waterfootprint</i>
	daraus abgeleitete Endpunkte Ergänzung: Je nach Anbaubedingungen Einsatz von Dünger, Pestiziden, Bewässerung <i>UBA, proplanta, ecoinvent</i>
5	Energiebedarf/-verbrauch: Diesel für Betrieb der Maschinen zur Bearbeitung von Böden und zur Ernte, Strombedarfe für Bewässerung, Durchführung der Ernte, <i>ecoinvent, SimaPro</i>
	Transport: <i>Ecoinvent version 2.0 und ESU Services Primärenergiefaktoren von Transportsystemen, 2011</i>
6	Verwendung/Nutzung: Lagerung, Weiterverarbeitung, Verbrauch
7	Entsorgungszszenarien für Reststoff oder Produktionsabfall aus den verschiedenen Nutzungen <i>UBA, Statista, SimaPro5, ecoinvent, umberto</i> ,
8	Gewichtung/Bilanz Zusammenfassung: Produktion versus Verbrauch
9	Ökobilanzierung

Diese Anpassungen erwiesen sich bei der Anwendung des digitalen Tools zur Betrachtung von LCA technischer Produkte als elementar. Mit dieser normierten Struktur gelang es, sowohl den betreuenden Lehrkräften und Dozenten einen Leitfaden mit Vorschlägen zum Einstieg, zur Durchführung und zur Erkenntnissicherung von LCA am Beispiel ausgewählter Produkte in drei Schwierigkeitsgraden anzubieten als auch Lernenden ab der Sekundarstufe 9/10 der allgemeinbildenden und beruflichen Schulen und des Hochschulbereichs Anleitungen zur Erschließung dieser komplexen Materie zu bieten.

Für Lehrkräfte/Ausbilder/Dozenten/Kursleiter

- Leitfaden LCA und produktbezogene Endpunkte
- Leitfaden mit Verlaufsplan zur Lerneinheit mit Zeitangaben
- Materialien: ABs, Druckvorlagen, Versuchsbeschreibungen, DATA-SETS, Fließschemata
- Liste zu Datenquellen, Medienangeboten, weiterführender Literatur, Bestelladressen

Für SuS/Ausbildenden/Studierende/Interessierte

- ABs - Fakten-Check, Endpunkte komprimiert, Argumentationsblatt
- Druckvorlagen - Weltkarte und Wertschöpfungskette,
- Versuchsbeschreibungen – wenn es Praxisanteile zum Set ergeben
- DATA-SETS zur kalkulatorischen Bearbeitung via Excel, Numbers und LCA-Tool mit Sankey

Die Arbeitsblätter AB 1-3(4) mit den beiden Druckvorlagen sowie dem DATA-SET bzw. dem SimaPro5-Tool sollen Lernende bei der Erschließung der Faktenlage zu ihrem Produkt anleiten und unterstützen. Selbstverständlich sind die SuS / Studierenden in der Gestaltung ihrer analogen oder digitalen MindMaps frei. Jedes Gruppenmitglied kann so seine individuellen Stärken - sei es analytisch, organisatorisch, gestalterisch, sprachlich - in die Gruppenarbeit einbringen. Eine Binnendifferenzierung ist im schulischen Kontext möglich.

3.5. Exposees der LCA-Anwendungsbeispiele

Schwerpunkt **aller** LCA-Betrachtungen ist die Datenanalyse. Die Durchdringung und Visualisierung der relevanten Zahlen - beispielsweise die Extraktion valider Verbrauchsmengen und resultierenden Produktionserträgen - mit harmonisierten Einheiten sind Voraussetzung für die korrekte und aussagekräftige Interpretation einer LCA mit den daraus ableitbaren Konsequenzen. Je nach betrachtetem Endpunkt und dem Umfang des dafür aufbereiteten Daten-Sets gelingen dem Leistungsstand der Lerngruppe anpassbare Durchdringungstiefen. Gruppenarbeiten bieten sich an.

Wie bereits auf Seite 26 erläutert, gliedert sich das LCA-Material in die Arbeitsschritte Einstieg, Praxis, Gruppenarbeit, Präsentation der Ergebnisse und Diskussion. Lebensmittel und landwirtschaftliche Produkte eignen sich als „einfacher“ Einstieg zur Betrachtung der **Endpunkte Wasserverbrauch und Flächenbedarf** besonders gut. Auf Basis der Produktionsdaten aus FAOSTAT, ergänzt um Werte aus Studien des Water Footprint Network, des Öko-Instituts sowie Statista können die Anbaubedingungen von beispielsweise Kartoffeln, Orangen oder Naturlatex im Ländervergleich generell thematisiert werden. Die geographischen und klimatischen Bedingungen vor Ort, die Verfügbarkeit von Wasser, die Bodenbeschaffenheit, Anbaumethoden, der Einsatz von Bewässerungstechnologien, die Verfügbarkeit von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln u.v.m. beeinflussen die Erntemengen, Qualitäten und Preise der Agrarprodukte in den Erzeugerländern. In Tabelle 13 sind die entwickelten Materialien zu einem Produkt in der Übersicht dargestellt.

Tabelle 13: Übersicht LCA-Angebote mit einem Produkt

LCA eines Produkts	Endpunkt / Bewertungsmethode					Schwierigkeitsgrad	Praxisanteil
	Flächenbedarf	Wasserfußabdruck	CO ₂ -Fußabdruck	Energiebedarf	Ökobilanzierung Eco-Indicator 99		
Kartoffel aus der Wüste	x	x				einfach	
Avocado	x	x				einfach	x
Lachs aus Aquakultur					x	moderat	
Orangen	x	x	x	x		moderat	x
Orangensaft	x	x	x	x		moderat	x
Kaffeemaschine					x	moderat	
Monobloc Plastikstuhl					x	moderat	
Reifen	x	x	x			einfach	x
Metalle Alu, Gold, Kupfer (für iPads)					x	moderat	x
Li-Ionen-Akku	x	x	x	x	x	komplex	x

Die Schwierigkeitsstufen erhöhen sich von einfach über moderat hin zu komplex. Je mehr Endpunkte betrachtet werden sollen, desto umfangreicher werden die aufbereiteten DATA-SETS. Die Ökobilanzierung stellt die höchste Schwierigkeitsstufe dar, erfordert doch die umfangreichste Einführung in die LCA-Methodik selbst und die Interpretation der erhaltenen Daten.

Die LCA lebt von Vergleichen. Es ist also sinnvoll, ähnliche Produkte oder ganze Produktfamilien zu untersuchen. Mit aufbereiteten und harmonisierten Diagrammen werden Stoffströme und Kennzahlen (Wasser, Abwasser, Energie, Rohstoffe, Produkte, Abfälle, Recyclingrouten) verdeutlicht. Wie sieht die Ökobilanz aus, wenn unterschiedliche Prozessführungen kalkuliert werden?

Tabelle 14: Übersicht LCA-Anwendungsbeispiele mit komplexer Systemanalyse

LCA mehrer Produkte	Endpunkt / Bewertungsmethode					Schwierigkeitsgrad	Praxisanteil
	Flächenbedarf	Wasserfußabdruck	CO ₂ -Fußabdruck GHG-Emission	Energiebedarf	Ökobilanzierung Eco-Indicator 99		
Palmöl versus Kokosöl	x	x	x			einfach	x
Kuhmilch versus Hafer-Drink	x	x	x			einfach	x
Burger aus Beef oder Soja					x	moderat	
Glas versus PET-Flaschen	x	x	x			einfach	x
Transport von Personen & Gütern	x		x	x		moderat	
Metalle Alu, Gold, Kupfer (für iPads)					x	einfach	
Getreide					x	moderat	
Lösungsmittel im Vergleich Hexan, Acetonitril und Ethanol			x		x	komplex	x
Kuhmilch & pflanzl. Alternativen	x	x	x			moderat	x

An ausgewählten Beispielen (z.B. Einsatz verschiedener Katalysatoren, Synthesekaskaden) wird verdeutlicht, wie LCA als Informations-, Planungs- und Zielverfolgungsinstrument genutzt werden kann, um Schwachstellen in Prozessen offenzulegen. Wie sieht die Ökobilanz aus, wenn unterschiedliche Prozessführungen kalkuliert werden? Am Beispiel einfacher Synthesen soll dieser **prospektive Einsatz der LCA** untersucht werden.

Tabelle 15: Übersicht LCA in der Laborpraxis und in Synthesen

LCA für Synthesen	Endpunkt / Bewertungsmethode					Schwierigkeitsgrad	Praxisanteil
	Flächenbedarf	Wasserfußabdruck	CO ₂ -Fußabdruck	Energiebedarf	Ökobilanzierung Eco-Indicator 99		
Grüner Wasserstoff			x	x		moderat	
Methanol auf dreierlei Art					x	komplex	x
Öle aus Algen und aus Pflanzen		x	x		x	moderat	x
Synthese von Alkylacetaten			x	x	x	komplex	
Ethylenoxid-Katalyse mit O ₂ oder			x	x	x	moderat	

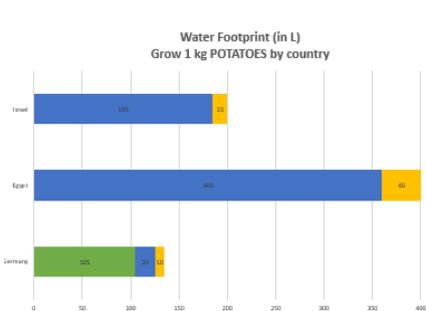
An ausgewählten Produktbeispielen sollen Bedingungen für eine nachhaltige stoffliche Verwertung untersucht werden. Die LCA wird dabei als Steuerungselement vorgestellt, um jeden Prozessschritt hinsichtlich Wasser-, Ressourcen- und Energiebedarf und Emissionsfreisetzung zu beurteilen. Mit Sankey-Diagrammen werden dabei die Stoffströme visualisiert. im Labor demonstriert werden.

Tabelle 16: Übersicht LCA als Steuerungselement für nachhaltige Recyclingmethoden

LCA im Recycling	Endpunkt / Bewertungsmethode					Schwierig-	Praxis-
	Flächen-	Wasser-	CO ₂ -	Energie-	Ökobilanzierung		
Recycling von Alu, Gold, Kupfer (für iPads)			x	x	x	moderat	x
Lithium für die E-Mobilität					x	komplex	
Naturkautschuk in Autoreifen		x	x		x	moderat	x
Monobloc und Polypropylen			x	x	x	komplex	
PET aus Getränkeflaschen		x	x		x	moderat	x
Altglas					x	komplex	
Phosphat-Rückgewinnung			x	x	x	komplex	x
Altpapier und Pappe					x	komplex	x

Derzeit sind 33 Modulangebote verfasst worden, die sich in unterschiedlichen Stadien der Evaluierung befinden. Sind diese erfolgreich abgeschlossen, werden die Angebote auf der Lernplattform zur Verfügung gestellt. In zwei Beispielen sollen zum einen ein LC-Angebot der einfachsten Angebotsform als auch ein komplexes Modulangebot beschrieben und erläutert werden.

BEISPIEL 1: Das LCA-Modulangebot „(Früh-)Kartoffeln - regional oder aus der Wüste“ sollte eine Diskussion über die unterschiedlichen Produktionsbedingungen von Kartoffeln in Ägypten und Deutschland anregen. Ägypten konnte sich in der vergangenen Dekade den Zugang zum nordeuropäischen Markt (vor allem in Deutschland) für ihre Frühkartoffeln im Zeitraum März bis Mai erschließen, weil regional produzierte Frühkartoffeln in Deutschland erst ab Ende Mai auf den Markt gelangen. Aus traditionellen Gründen verlangt die hiesige Kundschaft spätestens zur Osterzeit aber nach „neuen“ Kartoffeln und die über den Winter gelagerten Kartoffeln werden zu Ladenhütern.



Water Footprint Grau 1 kg	water source			total
	green	blue	grey	
Germany	105	20	10	135
Egypt		360	40	400
Israel		165	15	200

Zunächst erhalten die SuS in zwei Arbeitsblättern AB 1+2 Informationen zur Feldfrucht Kartoffel und die zu ihrem

Wachstum erforderlichen Wassermengen, um den erten Endpunkt „Wasserverbrauch/virtuelles Wasser“ bearbeiten zu können. Als Quellen wurden Arbeiten von Mekonnen & Hoekstra (2010), Poore & Nemecek (2018) sowie die Website ProPlanta (www.proplanta.de) herangezogen. Gegenübergestellt wurden die zur Produktion von 1 kg Kartoffeln benötigten Wassermengen (in Liter) und ihren Ursprüngen in Deutschland und Ägypten. Ergänzend dazu wurden die Wassermengen im Erzeugerland Israel aufgeführt. Aufgrund einer effizienten Bewässerungstechnologie gelingt es dort, unter vergleichbaren klimatischen Bedingungen wie in Ägypten mit nur halb so viel Wasser 1 kg Kartoffeln zu produzieren. Bereits in diesem Stadium der Bearbeitung kann eine grafische Aufbereitung der Daten via Excel oder Numbers angeleitet werden. Verschiedene Diagrammtypen können gewählt und die Farben verändert werden. Auch die korrekte Achsenbeschriftung und Skalierung kann eingeübt werden.

Der stark an das Schulfach Geographie angelehnte Einstieg an den zweiten in diesem Modul relevanten LCA-Endpunkt „Flächenverbrauch“ soll zunächst den Blick der SuS für das Datenmaterial zur Gesamtfläche der Länder selbst sowie die Aufteilung in die landwirtschaftliche Nutzung schärfen. Hierzu wurden die via FAOSTAT bezogenen Daten aufbereitet und harmonisiert, d.h. alle km²-Flächenangaben auf Hektar umgerechnet, um eine bessere Relation zur Produktion zu erhalten, die in Tonne je Hektar angegeben wird.

Ohne diese Harmonisierung wüchse die obenstehende Tabelle xx auf die doppelte Spaltenanzahl an, was einer erfolgreichen Bearbeitung durch die Mehrzahl der SuS entgegenstehen würde. Wenn extrahierbar, wurde außerdem daraus der Anteil der Anbaufläche des betrachteten Produkts an der landwirtschaftlichen Gesamtfläche explizit ausgewiesen und sowohl in Flächenanteil X 1.000 Hektar als auch in ihren prozentualen Anteilen aufbereitet. Bereits das Verständnis für und die Bearbeitung von Beträgen in dieser Tabelle erfordert von den SuS ab Jahrgangsstufe 9 erhebliches Abstraktionsvermögen.



AB 3 DATENBLATT (Kenndaten zum Flächenverbrauch)

Flächenverbrauch von Kartoffeln aus regionalem Anbau & Importware im Vergleich 2019/20 In den Erzeugerländern benötigen die Kartoffeläcker Flächen, die in der Tabelle angegeben sind. Die Bezugsgrößen für eine landwirtschaftlich genutzte Fläche ist Hektar (ha). 1 ha sind 10.000 m² (zum Vergleich: 1 Fußballfeld hat eine Fläche von 7.140 m²).

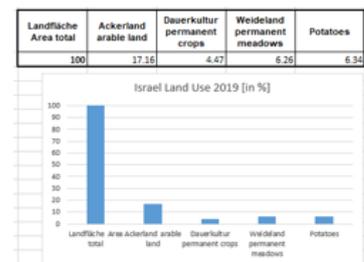
data 2019/20, www.fao.org		Landuse in 1.000 ha				
Land Country	Bezugsgröße Allocation	Landfläche Area total	Ackerland arable land	Dauerkultur permanent crops	Weideland permanent meadows	Potatoes
Brazil	in [ha]	851.577	55762	7756	173361	117
	in [%]		6.55	0.91	20.36	0.014
China	in [ha]	959.696	119513	16206	392834	4218
	in [%]		12.45	1.69	40.93	0.44
Egypt	in [ha]	100.145	2911	925		179
	in [%]		2.91	0.92		0.18
Germany	in [ha]	35.759	11714	200	4751	277
	in [%]		32.76	0.56	13.29	0.77

Anhand von Aufgaben und Fragen ergibt sich ein kleiner Leitfaden zur schrittweisen Erarbeitung des Zahlenmaterials.

Ziel soll sein, die Anwendung numerischer Programme (Excel, Numbers) zu vertiefen, die Visualisierung von Daten zu trainieren sowie die formalen Rahmenbedingungen (Skalierung, Titel, Legende, Achsenbeschriftung, etc.) korrekt und vollständig anzuwenden.

AUFGABEN:

- Sichtet die Daten zur Landwirtschaft und Produktion der Erzeugerländer. Wertet sie grafisch aus. Nutzt dazu das Data-Set in Excel oder Numbers.
- Das Verhältnis landwirtschaftlich nutzbarer Fläche zur Gesamtfläche eines Landes beträgt im Mittel 1:2. Woran liegt das? Wie sieht es bei Russland und Ägypten aus? Nutze dazu die Weltkarte und Google Maps.
- Schaut via Google Earth und beschreibt die Anbaubereiche für Kartoffeln in einem ausgewählten Land.



Ferner soll in im weiteren Bearbeitungsverlauf eine Interpretation des grafisch aufbereiteten Datenmaterials erfolgen: Im Beispieldiagramm entfallen in Israel ca. 28 % der Landesfläche auf landwirtschaftlich genutzte Fläche. 17 % davon wird als Ackerland bewirtschaftet, wovon wiederum 6,3 % (= über 1/3) für den Anbau von Kartoffeln genutzt werden.

Querverweise auf klimatische Bedingungen, topografische Karten versetzen SuS bereits jetzt in die Lage, zwischen verfügbarer und nutzbarer Fläche zu unterscheiden, ertragslimitierende oder fördernde Faktoren zu eruieren, Zusammenhänge zwischen Produktionsleistung und variablen geografischen und klimatischen Bedingungen zu erkennen und im Ländervergleich sachbezogen zu diskutieren, ohne die absoluten Hektarangaben bemühen zu müssen. Je nach Leistungsvermögen und Interesse der Lerngruppe kann hier das Modul beendet werden oder aber auf Expertenniveau fortgesetzt werden.

Via FAOSTAT sind nicht nur Daten zu Produktionsmengen landwirtschaftlicher Güter je Erzeugerland verfügbar. Über die Datenbank können auch Angaben zum jeweiligen Ertrag in hg/ha ausgelesen werden. Dies erlaubt Rückschlüsse auf die Effizienz der Produktion.

AB 4 GRUPPENDISKUSSION - EXPERTENRUNDE

KARTOFFEL: Produktionszahlen und Flächenerträge im Vergleich 2019/20 In deutschen Haushalten haben Kartoffeln ihren festen Platz. Auch im Winter und Frühjahr. Wo kommen sie her, wie werden sie produziert und welchen Flächenbedarf haben die Äcker. Wie effizient ist der Anbau in den Erzeugerländern?

data 2019/20, www.fao.org		Potatoes - Production and Yield					
Country / Allocation	Country Area in [1.000 ha]	Area harvested			Yield		
		in [1000 ha]	in [%]	in [t]	hg/ha	kg/ha	t/ha
Brazil	851.577	117	0.014	3767769	321337	32134	32.1
China	959.696	4218	0.44	78236596	185474	18547	18.5
Egypt	100.145	179	0.18	5215905	292031	29203	29.2
Germany	35.759	274	0.77	117151000	428340	42834	42.8
India	328.726	2158	0.66	51300000	237720	23772	23.8
Israel	2.238	142	6.34	498868	351712	35171	35.2

Wie bereits oben beschrieben wurden auch die Ertrags-Daten für Kartoffeln aufbereitet und harmonisiert, d.h. alle Angaben von Hektogramm zunächst in Kilogramm und anschließend in Tonne pro Hektar umgerechnet.

Die SuS sind bereits im Umgang mit den numerischen Tools versierter und sollen anhand des Fragenleitfadens die Effizienz verschiedener Erzeugerländer untersuchen, vergleichen und Vermutungen / Begründungen für hohe bzw. geringe Effizienz liefern. Als Hinweise sind produktionsrelevante Stichworte aufgeführt (Klima, Bodenbeschaffenheit, Wasserverfügbarkeit, Schädlinge) und eine Ergebnistabelle entworfen worden, die zurückführend zu Fragestellung „Kartoffeln – regional oder aus der Wüste“ als Diskussions- und Argumentationsgrundlage für die abschließende Sicherung der Ergebnisse in Form einer Podiumsdiskussion, als Expertenrunde oder als Gruppenpuzzle gelten soll. Eine Präsentation via Keynote, Powerpoint, Padlet oder als Poster kann ebenfalls erstellt werden.

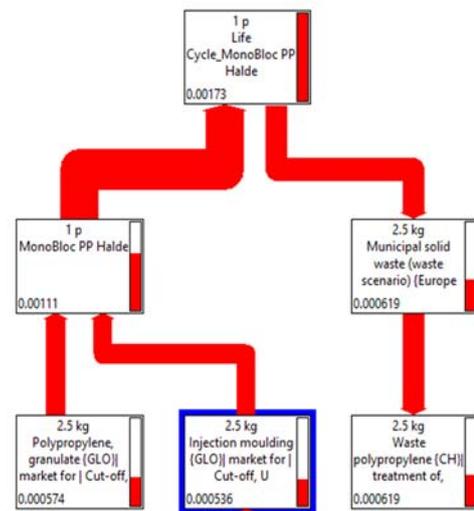
BEISPIEL 2: Am Beispiel des Plastikstuhls „**Monobloc**“ soll eine Ökobilanzierung mit drei unterschiedlichen Entsorgungsszenarien, der Deponierung, dem Recycling und der Verbrennung, anhand des LCA-Tools „SimaPro5“ durchgeführt werden. Zum besseren Verständnis wurde in einem FACT SHEET die Methode der Ökobilanz erläutert und in einem FACT TOOL eine Schritt-für-Schritt Arbeitsanleitung zur Handhabung von SimaPro5 entwickelt. Ergänzend dazu liegt eine Interpretationshilfe dazu vor. Die drei Unterlagen sind in der Rubrik BASISWISSEN hinterlegt.

Die Produktion eines Stücks (monobloc) in einem einzigen Arbeitsgang gab dem Stuhl den Namen, denn im Spritzgussverfahren kann aus 2,5 kg Polypropylen-Granulat PP im Wert von 2,50 Euro in nur 56 Sekunden ein Stuhl hergestellt werden. Innerhalb von 24 Stunden werden bis zu 1.500 Stühle produziert! Fortschritte in der chemisch-technischen Aufbereitung des Erdöls zu Kunststoffen mit wetterbeständigen und tragfähigen Eigenschaften sowie effiziente Polymerisationsverfahren sind die Grundlagen für die Monobloc-Produktion in so hohen Stückzahlen zum niedrigen Preis.

Anhand von Aufgaben soll den SuS/ Studierenden eine Anleitung geboten werden, sich mit der Produktion von Kunststoffen, den speziellen Verarbeitungstechniken, der An- bzw. Verwendungsbreite sowie den möglichen Entsorgungsszenarien informieren. Neben den technischen und umweltrelevanten Aspekten des LCA zum „Monobloc“ können auch dessen sozioökonomische Relevanz diskutiert werden. Handelt es sich doch bei diesem Plastikgestühl um das weltweit am häufigsten genutzte Sitzmöbel überhaupt. In der wohlhabenden Welt wird er oftmals geschmäht, in Entwicklungsländern besitzt er dagegen einen hohen Stellenwert.

Und was geschieht mit dem Stuhl am Ende seines Gebrauchs?

Das Software-Tool SimaPro5 in der lizenzierten Version bietet sowohl Einzelfallbetrachtungen als auch parallele Bewertungen alternativer Materialquellen, Prozessführungen, Entsorgungswege etc. an. Mit der DEMO-Version geht das - etwas eingeschränkt - ebenfalls. Im FACT TOOL – **Einführung in die Arbeit mit dem LCA-Tool SimaPro5** sind die Dateneingaben bzw. Auswahlmodalitäten detailliert aufgeführt, um die Durchführung einer Ökobilanzierung mit dem Software-Tool für den „Monobloc“ in der Demovariante erfolgreich absolvieren zu können. Mit der Beschreibung des Monoblocs haben die Lernenden die wichtigsten Informationen für die Ökobilanzierung erhalten. Eines der Entsorgungsszenarien - Deponierung, Recycling oder Verbrennung - wird ausgewählt und in die Bilanzierung eingebunden.



Entsprechend der DIN-ISO-Norm sind die Eingaben zu Material, Mengen, Verarbeitungsprozessen und End-of-Life-Szenarien in einer festgelegten Reihenfolge in das Programm einzupflegen. Auch die Charakterisierung nach Schadenskategorien, die Normalisierung und Gewichtung ist in einer festgelegten Abfolge zu tun. Das FACT Tool liefert eine Schritt-für-Schritt Anleitung. Insgesamt sind 37 Eingaben nötig!

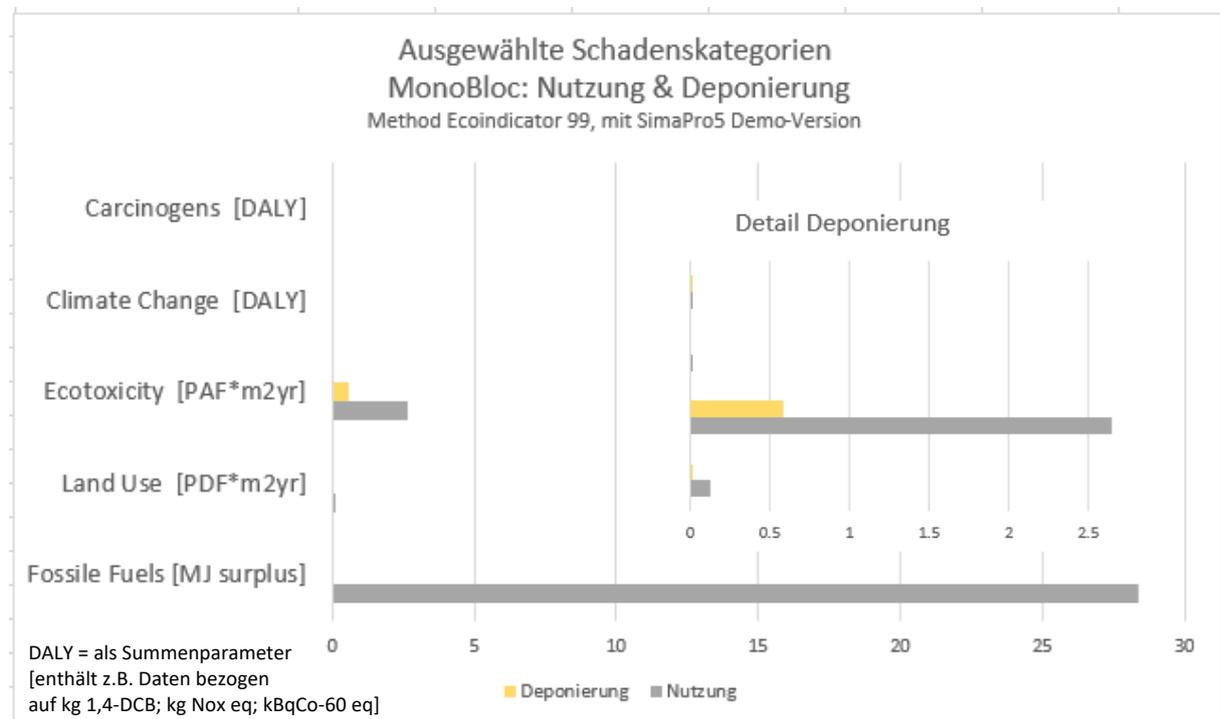
Der erste Teil der Analyse liefert ein Stoffstromdiagramm (Sankey). Es steht für die Deponierung des Monoblocs und wäre um weitere Materialien, Prozesse und Energiebedarfe erweiterbar.

Nach Klassifizierung, Charakterisierung, Normalisierung und Gewichtung ergibt sich für die Ökobilanz „Monobloc mit Deponierung“ nebenstehende Ergebnistabelle. Die Werte sind nach Schadenskategorien gruppiert und für die Nutzung und das Entsorgungsszenario separiert ausgewiesen.

Schadenskategorie	Einheit	Summe	Nutzung	Deponierung
Carcinogens	DALY	7.05E-06	1.7E-06	5.35E-06
Resp. Organics	DALY	1.32E-08	1.3E-08	1.3E-10
Resp. Inorganic	DALY	6.26E-06	6.2E-06	3.24E-08
Climate Change	DALY	1.82E-06	1.8E-06	4.29E-08
Radiation	DALY	1.39E-08	1.4E-08	7.15E-11
Ozone Layer	DALY	3.39E-10	3.3E-10	6.44E-12
Ecotoxicity	PAF*m2yr	3.22	2.64	0.584
Acidification/Eutrophication	PDF*m2yr	0.122	0.121	0.00104
Land Use	PDF*m2yr	0.135	0.131	0.00456
Minerals	MJ surplus	0.123	0.123	0.000447
Fossile Fuels	MJ surplus	28.5	28.4	0.0747

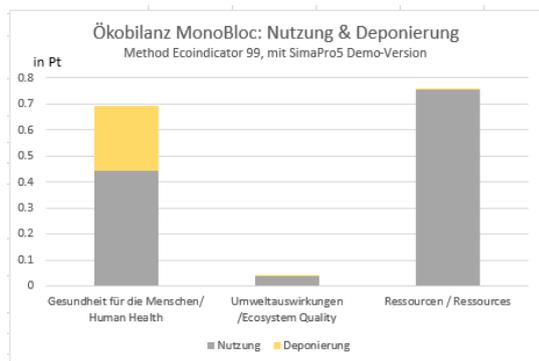
DALY = Disability Adjusted Life Year; Summenparameter
 [enthält z.B. Daten bezogen auf kg 1,4-DCB; kg Nox eq; kBqCo-60 eq]
 PAF Potentially Affected Fraction of species
 PDF Potentially Disappeared Fraction of species

Die grafische Aufbereitung konzentriert sich auf fünf der 11 Schadenskategorien. Die Produktion des aus Polypropylen bestehenden Monoblocs geht zu Lasten der fossilen und energetischen Ressourcen. Die Zusammensetzung des dabei verwendeten Energiemix hat erheblichen Einfluss auf die Ökobilanz.



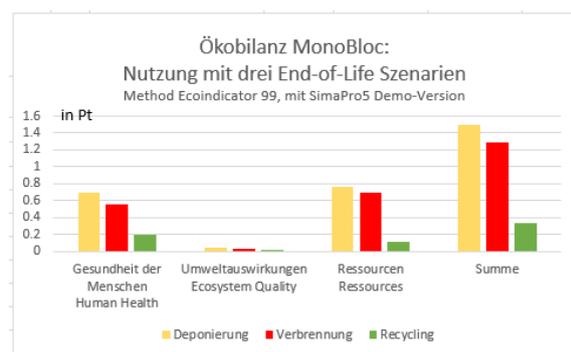
Die Gesundheit und die Umwelt sind erheblich beeinträchtigt. Vor allem das krebserregende Potenzial ist zu erwähnen. Wenn der Stuhl nach seiner Nutzung deponiert wird, verbleiben die in ihm enthaltenden Ressourcen ungenutzt. Besonders fossilbasierte Kunststoffe besitzen jedoch eine hohe Energiedichte, die besser einer sekundären Nutzung (z.B. Verbrennung) zugeführt oder aber recycelt werden sollten.

Das Ergebnis der Ökobilanzierung kumuliert in einem einzigen Wert, dem Eco-Point (Pt). 1 Pt (Eco Point) steht für 1/1.000stel des jährlichen Umwelteintrags (Environmental Load) eines europäischen Durchschnittsbürgers. Voraussetzung für eine sinnvolle Ergebnisinterpretation und -sicherung ist die Kenntnis über die Zusammenhänge zwischen den in der LCA relevanten Schadenskategorien und dessen Normalisierung und Gewichtung innerhalb der drei betrachteten Endpunkte der Analyse. Im FACT-SHEET – Interpretationshilfe wird am Beispiel des Aluminiums der Zusammenhang analytisch messbaren Schadparametern, ihren Wirkweisen in den Umweltkompartimenten und die anschließende Gewichtung bis hin zu den Endpunkten erläutert. Die Endpunkte „Menschliche Gesundheit“, „Umwelteinfluss“ und „Ressourcenverbrauch“ sind für das Szenario Monobloc und Deponierung in der Grafik links dargestellt. Die Nutzung enthält die zur Herstellung des Polypropylens benötigten fossilen und energetischen Ressourcen, die bei einer Deponierung ungenutzt bleiben und zur Umweltverschmutzung beitragen.



Schadenskategorie	Einheit	Nutzung	Deponierung	Summe Pt
Gesundheit für die Menschen/ Human Health	Pt	0.444	0.248	0.692
Umweltauswirkungen / Ecosystem Quality	Pt	0.0361	0.00447	0.0405
Ressourcen / Resources	Pt	0.756	0.00199	0.758
Summe	Pt	1.24	0.254	1.49

Das Data-Set soll als Anregung und Vorlage für die grafische Aufbereitung und als Interpretationshilfe verstanden werden. Die erzielten Ergebnisse aus dem LCA Monobloc mit Deponierung, Recycling oder Verbrennung sind darin tabellarisch (als Eco-Points und als Prozentwerte) und grafisch aufbereitet. Mit der abschließenden **Präsentation der Ergebnisse** (via Keynote, Powerpoint, Padlet oder als Poster) und **Diskussion** (als Gruppenpuzzle / Podiumsdiskussion / Expertenrunde) gelingt die Vermittlung der Resultate aus den Gruppenarbeiten hin zur gesamten Lerngruppe. Die **Schadstoffe und Einflussparameter** sollen als Argumentationshilfe in einer Expertenrunde die pros & cons zum jeweiligen Produkt und den hier zur Diskussion stehenden Entsorgungsszenarien liefern.



Schadenskategorie	Einheit	Deponierung	Verbrennung	Recycling
Gesundheit der Menschen / Human Health	Pt	0.692	0.555	0.204
Umweltauswirkungen / Ecosystem Quality	Pt	0.0405	0.0357	0.0198
Ressourcen / Resources	Pt	0.758	0.698	0.115
Summe	Pt	1.49	1.29	0.339

Kunststoffe basieren auf fossilen Ressourcen und besitzen eine hohe energetische Dichte. Eine thermische Verwertung ist also einer Deponierung auf alle Fälle vorzuziehen. Aber auch für PP gelingt seit Neuestem ein Re- bzw. Downcycling. Voraussetzung ist jedoch, dass nicht zu hohe Anteile an Fremdstoffen wie beispielsweise Farbstoffe, Polymerisationsstarter, Vernetzungsmittel, UV-Stabilisatoren etc. dem PP-Polymer beigemischt wurden. Im Downcycling werden die Monoblocs in ihre Grundbestandteile zerlegt, das PP mit neuen Stoffen gemischt und in völlig neuer Form wieder in den Kreislauf importiert. Es gelingt aber nicht, wiederum Kunststoffstühle aus dem Recycling-PP zu fertigen. Es entstehen qualitativ schlechtere Endprodukte wie beispielsweise Blumenkübel.

3.6. Digitale Aufbereitung und Entwicklung eines Webauftritts



Das Logo des Projekts stellt ein Tablet mit einem der Kreislaufwirtschaft angelehntes Pfeilsymbol dar. Unter www.lca-meets-efs.net ging das Angebot online. EFS ist ein neu zu etablierender Begriff und steht für „Education for Sustainability“.

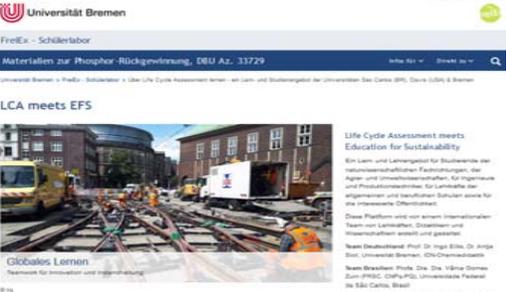
Abbildung 8: Logo des Projekts mit neuer Kennung

Baukastensysteme von WIX.com oder vergleichbarer Anbieter wurden hinsichtlich der zulässigen Datenvolumen, includierter transformierender Tools und Lizenzgebühren geprüft. Auch war eine Verbreitung der Lerninhalte auf einer Moodle-basierten Plattform denkbar. Aus zweierlei Gründen wurde jedoch davon abgesehen. Zum einen erforderte das Hosting einer freien Seite eine anmeldungspflichtige Zulassung Interessierter zur Plattform. Dies erschien organisatorisch nicht leistbar und im Hinblick auf die Internationalität dieses Angebots kontraproduktiv. Zum anderen sollte das Angebot auch nach Ablauf der Förderung verfügbar und einfach zu aktualisieren sein.

Daher wurde das Hosting der LCA-Lern- und Lehrinhalte an die Universität Bremen geleitet. Unter der URL www.LCA-meets-Efs.net ist das Webangebot international erreichbar. Es wurde eine Weiterleitung zur universitären Website eingerichtet und ist dort unter der URL <https://www.uni-bremen.de/freix/lca> verortet. Sie ist barrierefrei. Die Einbindung digitaler Elemente erfolgt derzeit noch über die Verlinkung zu einem Dropbox-Ordner, der als Speichermedium für große Datenvolumina fungiert. Die Dropbox-Verlinkungen sind jedoch zeitlich begrenzt. Solange die Materialien noch in der Erprobung sind, ist das kein Problem. Für eine permanente Bereitstellung soll daher der universitäre Seafire-Server zukünftig diese Aufgabe übernehmen.

Zur GENESE der Website: Die Seite wurde im Verlauf der Projektlaufzeit gleich 3mal neu konzipiert und dabei immer stärker vereinfacht. In Tabelle xx sind die Entwicklungsschritte mit ausgewählten Screen Shots dargestellt. Der erste Entwurf sah vor, ausgehend von einer Hauptseite auf die im Projekt fokussierten LCA-Endpunkte zu verlinken. Auf den Subseiten sollten Fachinformationen zu den Endpunkten gegeben und die Materialien adressatengerecht angeboten werden. Freie Webanbieter offerieren eine Vielzahl ansprechender Gestaltungselemente. Der geplante Aufbau führte jedoch zu einem Konflikt zwischen Informationsfülle und Übersichtlichkeit. Es bestand die Gefahr, dass sich die Nutzer in einer Vielzahl von Ebenen und Verschachtelungen verirren und den Überblick verlieren. Zudem erforderte das freie Hosting eine dauerhafte Überarbeitung auch nach Ablauf der Förderung. Die Universität Bremen bietet diese Hostingdienste an. Der universitäre Webauftritt wird mit Hilfe des Programms Typo3 erstellt. Das Baukastensystem offeriert eine Anzahl ausgewählter Gestaltungselemente und Features. Die Farbauswahl, Schrifttype, Größe und Position ist in Anlehnung an das Corporate Design der Bremer Universität zu treffen. Der Webauftritt sollte übersichtlich und möglichst flach gestaltet sein. Letztendlich verblieb eine Hauptseite mit einem download-Bereich in einer Unterebene. Die Informationsfülle wurde erheblich reduziert und zum größten Teil in Informationsschriften verschoben.

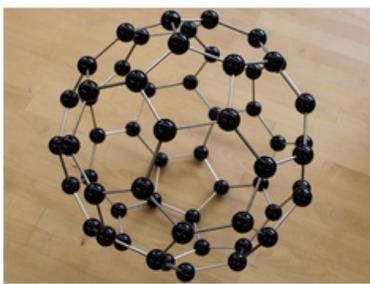
Tabelle 17: Genese der Projekt-Website mit ausgewählten Screen shots [URL <https://www.uni-bremen.de/freix/lca/>]

		
		<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div data-bbox="1384 651 1550 935">  <p>BASIC KNOWLEDGE Small learning units are designed to get you started on the topic. The materials, lots of links, laboratory scripts and data sets are available for download as docx, pptx, xls or pdf.</p> <p>RECYCLING Kritische Rohstoffe und die Potenziale der Kreislaufwirtschaft. Keramiken, Kunststoffe, Glas, Metalle, GFK... Wiederverwerten, um Sekundärrohstoffe zu erschaffen.</p> </div> <div data-bbox="1765 651 1951 919"> <p>MATERIALS TO DOWNLOAD</p> <ul style="list-style-type: none"> FACT SHEET Virtual Water FACT SHEET Land Use FACT SHEET CO₂-Footprint FACT SHEET LCA Interpretation FACT SHEET Transport and Traffic FACT TOOL LCA with SimaPro <p>MATERIALIEN zum DOWNLOAD</p> <ul style="list-style-type: none"> Aluminium- aus Bauxit oder Recyclingmaterial Seltene Erden Litium für die E-Mobilität Naturkautschuk, ein riskobehafteter Rohstoff Grüner Wasserstoff für die Stahlproduktion </div> </div>
<p>Nur als offline-Version und Prekonzeption. Bereits hier Konflikt zwischen Informationsfülle und Übersichtlichkeit. Freier Host erfordert dauerhafte Überarbeitung auch nach Ablauf der Förderung. Internationale Erreichbarkeit fraglich. Farbgestaltung frei....</p>		<p>LCA KUHMLICH & pflanzliche Alternativen</p> <p>Lehrinformation CF Verkaufslösung für LCA Angebot KUHMLICH CF Lösungsmittel AB 1.3 CF</p> <p>Kuhmilch AB 1.3 CF Häfer-Drink AB 1.3 CF Mandel-Drink AB 1.3 CF Bele-Drink AB 1.3 CF Sole-Drink AB 1.3 CF Webseite CF Veröffentlichungszettel CF</p> <p>Data-Set KUHMLICH CF LAB Report Häfer-Drink CF VIDEO Lab Häfer-Drink BAMLET Inhaltstoffe in der Übersicht CF</p>

Die Website bedient sich auf der Hauptseite der klassischen 2/3 links zu 1/3 rechts Aufteilung. Jeweils links wurden Abbildungen und Texte angeordnet. Rechts befindet sich der Informationsbereich und die Verlinkungen zur Downloadseite. Die Farbgestaltung beschränkt sich auf weiß neben blau in zwei Farbabstufungen. Die Schrift ist Helvetica in schwarz bzw. anthrazit. Die Verlinkung erscheint in blau. Bei den eingebundenen Bildern handelt es sich entweder um private Fotos oder wurden aus kostenlosen Bilddatenbanken entnommen. Die Copyrights sind unter den Abbildungen genannt. Beginnend mit einem 10 teiligen Bilderslider mit prägnanten Untertiteln wurden im Scroll-down zunächst eine Begriffserklärung und die Absicht der Website erläutert. Kombiniert wurden nachfolgend sechs Rubriken: Basiswissen, Lebensmittel, Gebrauchsgüter, Chemie und Energie, Recycling sowie Ökolabeling und Recht.

Beispielhaft ist die Rubrik „BASISWISSEN“ dargestellt, die knapp die Inhalte erläutert und über die verfügbaren Grundlagenmaterialien zu den verschiedenen LCA-Endpunkten offeriert. Die Verlinkung im hellblau abgesetzten Auswahlbereich führt auf die Subseite mit den Downloadangeboten.

Abbildung 9: Basiswissen und die hinterlegten Angebote



BASISWISSEN

Zum Einstieg in das Thema LCA sind kleine Lerneinheiten konzipiert, die komprimiert die Grundlagen zum Zweck, den Endpunkten (Zielen), der Vorgehensweise, den Ergebnissen sowie deren Bewertung liefern.

Die Materialien, Linklisten, Laborskripte und Data-Sets stehen für Sie in den Datei-Formaten .pdf, .pptx, oder .xlsx zum Herunterladen bereit. Falls Sie lieber eine Wordvorlage haben möchten, schreiben Sie uns bitte an.

MATERIALIEN zum DOWNLOAD

- [FACT SHEET Was ist LCA?](#)
- [FACT SHEET CO₂-Fussabdruck](#)
- [FACT SHEET Energieverbrauch](#)
- [FACT SHEET Flächenverbrauch](#)
- [FACT SHEET Kritische Rohstoffe](#)
- [FACT SHEET Ökobilanzierung](#)
- [FACT PRESI LCA Methode](#)
- [FACT TOOL LCA mit SimaPro5](#)
- [FACT SHEET LCA Interpretation](#)
- [FACT SHEET Transport und Verkehr](#)
- [FACT SHEET Virtuelles Wasser](#)

DOWNLOAD BEREICH

BASISWISSEN		
FACT SHEET Was ist LCA?	FACT SHEET Kritische Rohstoffe	FACT SHEET Ökobilanzierung
FACT SHEET CO₂-Fussabdruck	FACT PRESI LCA Methode	FACT SHEET Virtuelles Wasser
FACT SHEET Energieverbrauch	FACT TOOL LCA mit SimaPro5	
FACT SHEET Flächenverbrauch	FACT SHEET LCA Interpretation	
FACT SHEET Transport & Verkehr	AB 1-3 Transport von Personen	DATA SET TRANSPORT
	AB 1-3 Transport von Gütern	

Das zur Erstellung einer LCA erforderliche BASISWISSEN wurde in Form von 3-4seitigen FACT-SHEETS je Endpunkt bereitgestellt. In den FACT-SHEETS sind nicht nur die LCA-relevanten Begriffe selbst erläutert, sondern es wurden wichtige Hintergrundinformationen - die Definition, Wirksamkeit und Reichweite jedes Endpunktes betreffend - verarbeitet, die ein grundlegendes Verständnis zur Thematik liefern. Wenn es möglich war, wurde bereits in den FACT-SHEETS für die Anwender anhand nachvollziehbarer Beispiele die Begrifflichkeiten eingeführt und Zusammenhänge dargestellt. Es wurden FACT-SHEETS zu den Endpunkten Wassergebrauch/virtuelles Wasser, Flächenverbrauch, CO₂-Emission, Energiebedarf und Transport entwickelt. Die übergeordneten Hintergründe zur Durchführung einer LCA / Ökobilanz wurden in zwei FACT-SHEETS erläutert. Zur Durchführung einer

Ökobilanzierung nach der Methode des Eco Indicator 99 mit dem **Software-Tool SimaPro5** wurde ein Tutorial entwickelt, mit der schrittweise am Beispiel des Produkts „MONOBLOC“ eine Ökobilanzierung zur Produktion, Benutzung und stofflichen Verwertung des Plastikstuhls möglich ist. Ferner soll eine Interpretationshilfe die Deutung der Ergebnisse einer Ökobilanz erleichtern und die Ableitung notwendiger Konsequenzen aus ihnen unterstützen. Ergänzend zu den LCA-relevanten Stickworten wurde eine kurze Einführung zum Begriff Kritikalität mit Definition, Bedeutung und Reichweite anhand ausgewählter Beispiele entworfen.

Die Materialien werden in den Dateiformaten pdf, ppt, xlsx angeboten. Vor der ursprünglichen Idee, auch .docx Dokumente zur Verfügung zu stellen musste abgesehen werden. Dieses Format wird aus sicherheitstechnischen Gründen nicht mehr unterstützt. Für Nutzer, die gerne Änderungen in den Materialien vornehmen möchten, können diese selbstverständlich auf Anfrage erhalten. Die Materialsammlung wird auch nach Ablauf des Förderzeitraums laufend erweitert und ergänzt.

Die Übersetzung der entwickelten Angebote erfolgt zunächst via DEEPL. Eine Überprüfung und Anpassung der Fachtermini wurden und werden durch die Kooperationspartner vorgenommen. Bereitgestellt werden kann derzeit eine englischsprachige Fassung, der Aufbau weiterer Sprachen befindet sich im Fluss.

4. Ergebnisse und Öffentlichkeitsarbeit

4.1. Verwertungsplan und Öffentlichkeitsarbeit

Die Außendarstellung des Vorhabens erfolgte über die Internet-Seite der Universität Bremen unter www.lca-meets-efs.de (siehe auch Kapitel 36, Seite 35). Diese Seite wurde mit den überregionalen Homepages der bereits laufenden Projekte verlinkt, die die Angebote für Schulen und außerschulische Bildungsträger präsentieren. Daneben fand eine Dokumentation der Projektinhalte und -ergebnisse in den einschlägigen Fachmedien für Fachdidaktik und naturwissenschaftlichen Unterricht und Buchbeiträge statt.

Im Laufe des Vorhabens sollten zwei internationale dreitägige Workshops in Bremen zum Thema „GCE meets LCA“ stattfinden. Neben den bereits genannten Projektmitstreitern sollen weitere nationale und internationale Gäste eingeladen werden, sodass voraussichtlich je Veranstaltung 25-30 Personen erwartet werden können. Leider wurde dies als Präsenzveranstaltung nicht realisiert, jedoch konnten in digitalen kleineren Arbeitsrunden die ausgewählten Ergebnisse diskutiert und weiterentwickelt werden. Gleichwohl bestand und besteht ein kontinuierlicher Austausch zwischen den Partnern.

Ergebnisse aus dem Projekt werden auch über die Projektlaufzeit hinaus Gegenstand von Lehrerfortbildungen des Chemielehrerfortbildungszentrums Oldenburg-Bremen und auf einschlägigen Tagungen für Lehrkräfte der Naturwissenschaften sein.

4.2 Zur Situation an der Universität und den Schulen Bremens in Corona-Zeiten

Die Corona-Pandemie stellte in 2019/2020/2021 einige Hürden für Universitäten und Schulen auf, die einen Besuch von Schülerlaboren stark erschwerte bzw. unmöglich machte. Die Situation der Bremer Schulen war vor allem ab Herbst 2020 unbeständig, so dass die Lehrkräfte kaum bzw. keinen Spielraum zur Anwendung für nicht curriculare Angebote Dritter sahen. Zwischen dem WS 2020/21 bis zum Ende des SS 2022 bot die Universität Bremen für Studierende der naturwissenschaftlichen Fächer zwar

Präsenzveranstaltungen mit Praktikumsbetrieb unter Einhaltung der Corona-Schutzmaßnahmen an, nicht aber für externe Besuchergruppen. Erst ab dem Frühjahr 2022 erlaubte es die Infektionslage in Bremen, die Zugangsbeschränkungen für Studierende zurückzunehmen, ab Sommer 2022 konnte der Betrieb auch des Schülerlabors sukzessive wiederaufgenommen werden.

Nicht nur der schulische Unterricht und die Besuche im Schülerlabor waren durch die Corona-Pandemie stark beeinträchtigt, auch die universitäre Ausbildung hatte mit den Zugangsverboten und den nachfolgenden Arbeitsbeschränkungen zu kämpfen. Obwohl recht zeitnah viele Lehrangebote in online-Formaten angeboten wurden, konnten diese Laborpraktika oder gar experimentelle Entwicklungstätigkeiten nicht ersetzen. Leider führte diese Situation zu erheblichen Verzögerungen in den Studienabläufen vieler Studierenden, die auch aktuell noch nachwirken.

4.3. Qualifizierungsarbeiten

Ausgewählte Bestandteile der Lernplattform wurden im Rahmen von Qualifizierungsarbeiten (BSc. und MSc.) entwickelt. Neben der Umsetzung theoretischer als auch fachlicher Inhalte zu digitalen Lehr-Lern-Elementen sollten für die schulischen Adressaten auch Praxis-Angebote entstehen. Dadurch sollte besonders Schülerinnen und Schüler der Zugang zu diesen komplexen und sehr theoretischen Themen erleichtert werden. Zum Thema LCA wurden 25 Themen mit unterschiedlichen Schwerpunkten und abgestuften Komplexitäten ausgeschrieben. 9 Themen wurden überhaupt nicht in angewählt. Von den 16 verbliebenen Themen mussten 4 wiederholt ausgegeben werden, weil es zu Arbeitsaufgaben kam. Pandemie-bedingte finanzielle Engpässe aber vor allem psychische Probleme wurden von den Betroffenen als häufigste Begründung dafür angegeben. 14 Arbeiten wurden erfolgreich abgeschlossen, zwei befinden sich noch in der Bearbeitung.

Tabelle 18: Qualifizierungsarbeiten zum Thema LCA & Co.

Name	Thema	Status
Nicklas Hönicke	Masterarbeit M1: „Gestaltung einer digitalen Lernumgebung zum Wasserfußabdruck“	Abgeschlossen
Eric Schick	Bachelorarbeit B1: „Gewinnung wertiger Substanzen aus Orangenschalen als Beitrag zur nachhaltigen Chemie“	Abgeschlossen
Leonard Benecke	Masterarbeit M2: Angewandte Umwelttechnik im Schülerlabor – Adaption chemischer Experimentieranleitungen und Untersuchungsmethoden für Papier und Pappe	Abgeschlossen
Christoph Kulmann	Masterarbeit M3: Angewandte Umwelttechnik im Schülerlabor – Adaption chemischer Untersuchungsmethoden zu Inhaltsstoffen aus alten Getreidesorten	Abgeschlossen
Christopher Siemens	Bachelorarbeit B4: „Aquakulturen - Landwirtschaft gibt es auch im Wasser“	Abgeschlossen
Nicole Voss	Bachelorarbeit B2: „Ein Faktencheck zum Thema Milch - Vergleich von Kuhmilch und ihren pflanzlichen Pendanten hinsichtlich ihres Wasserfußabdrucks und des Flächenverbrauch“	Abgeschlossen
Ali Ugur	Bachelorarbeit B3: Food Loss & Food Waste – Strategien für einen nachhaltigen Umgang mit Lebensmitteln. Datenerhebung zu Verlusten bei der Produktion und dem Konsum ausgewählter Lebensmittel. Praktische Beispiele für ein praktisches Lehr-Lernangebot zum re- bzw. up cycling von unansehnlichen Gemüsen und Obst.	Abgeschlossen

Tabelle 18: Fortsetzung - Qualifizierungsarbeiten zum Thema LCA & Co.

Name	Thema	Status
Julia Schröder	Bachelorarbeit B8: Gezeitenkraftwerke – eine ungenutzte Energiequelle. State of the Art - Technik, Potentiale, Kosten, Nutzen und geologische Bedingungen zur Errichtung von Gezeitenkraftwerken.	Abgeschlossen
Steffen Fabian Göing	Bachelorarbeit B10: CCS – Ist die CO ₂ -Sequestrierung die Lösung unseres Klimaproblems? State of the Art - Technik, Potentiale, Kosten, Nutzen und geologische Bedingungen für eine CCS.	Abgeschlossen
Tom Kunert	Bachelorarbeit B11: Stand der aktuellen CO ₂ -Debatte in den Social Media – Fluch oder Segen? Über die Entstehung von Fehlvorstellungen in und über Chemie am Beispiel von Kohlenstoffdioxid.	Abgeschlossen
Caroindes Correa Gomez aus Brasilien	PhD (Aufenthalt für 3 Monate Jan.-März 2022) Development of a LCA Module „Soybean plant-based burger versus animal burger“ related to secondary school students and teacher students in Brazil.	Abgeschlossen
Jona Zyzmann	Bachelorarbeit B12: Green Labeling – welche Labels stehen für was? Ziel: Es ist ein Leitfaden zur besseren Übersicht und Bewertung zu entwickeln.	Abgeschlossen
Lukas Lehmkuhl	Bachelorarbeit B13: „Naturlatex - Verwendung des kritischen Rohstoffs in Autoreifen“	Abgeschlossen
Phillip Arnold	Masterarbeit M5: „Entwicklung einer Lerneinheit zu Metallen im Tablet und ihre energetische Bilanzierung“	Abgeschlossen

14 Qualifizierungsarbeiten sind erfolgreich abgeschlossen worden. In kleineren Themenkomplexen widmeten sich die Qualifikanten ausgewählten Produktionsaspekten von Lebensmitteln und Gebrauchsgütern unter Betrachtung der Endpunkte Flächenverbrauch, Wasserfußabdruck, Energiebedarf sowie der CO₂-Bilanzierung. In den Arbeiten sollte jeweils ein Abriss über Anbaubedingungen, Produktionsbeschreibungen, vor und nachgeschaltete Bedarfe, Erträge und eine Übersicht über die Verbreitung des Agrarprodukts / Gebrauchsgegenstands in Technik, Lebensmitteln, Kosmetik etc. nach bewährtem Schema aufbereitet werden. Auch Entsorgungsaspekte sollten eruiert werden. Zusätzlich galt es, relevante sozio-ökonomische Aspekte zu beleuchten und je nach Qualifizierungsgrad Vorschläge für eine Unterrichtsgestaltung zu offerieren oder ein kleine Unterrichtseinheiten zu entwickeln.

Die PhD-Studentin Frau Caroindes Correa Gomez aus Brasilien befasste sich im Verlauf ihres Auslandssemesters in Bremen (Jan.-März 2022) mit der „Ökobilanzierung von Burgerpatties aus Rindfleisch und aus Soja“ und der Entwicklung einer Unterrichtseinheit für Studierende des Lehramts Chemie und angrenzende Fachrichtungen. Mit Hilfe ihrer Arbeit konnte der LCA-Basiswissen-Material zur „Ökobilanzierung“ überarbeitet und validiert werden.

Aktuell werden auch nach offiziellem Projektende Qualifizierungsarbeiten durchgeführt. Derzeit sind zwei Arbeiten in Bearbeitung, weitere werden folgen.

Tabelle 19: Noch ausstehende Qualifizierungsarbeiten zum Thema LCA & Co.

Name	Thema	Status
Nadine Alessandra Lawniczak	Bachelorarbeit B1: „Zuckerrübe versus Zuckerrohr“	In Bearbeitung
Melani Yamile Dager Angulo	Bachelorarbeit B1: „Avocado“	In Bearbeitung

4.4. Lehrerfortbildungen

Es gelang leider nicht, die über das Lehrerfortbildungszentrum Osnabrück offerierten Veranstaltungen zum Thema LCA am 12.7. in HB und 27.9 in OS mit Leben zu füllen. Trotz intensiver Bewerbung fanden sich keine Interessenten. Die Verbreitung dieses komplexen und daher erläuterungsdürftigen Themas ist noch unzureichend umgesetzt.

Tabelle 20: Veranstaltungen - Lehrerfortbildung zum Thema LCA & Co.

Name	Thema	Status	Status
19.05.21	ISSU	Kuhmilch & pflanzliche Alternativen	18 Teilnehmer
13.12.21	EVC	Alu, Kuhmilch, Monobloc	21 Teilnehmer
15.7.22	Würzburg	Alu, Kuhmilch, Monobloc	8 Teilnehmer
14.3.22	Dortmund	Kuhmilch & pflanzliche Alternativen	14 Teilnehmer
30.8.22	SINUS Soest	Pflanzenöle	12 Teilnehmer
30.11.22	Blankenburg Thüringen	Kuhmilch & pflanzliche Alternativen, Monobloc	15 Teilnehmer
08.12.2022	MINT-TAG Bremen	Kuhmilch & pflanzliche Alternativen, Palmöl oder besser Kokosöl	20 Teilnehmer

4.5. Veranstaltungen in Schulen und Schülerlabor

Über den ganzen Projektzeitraum sollten punktuelle Implementierungen und Erprobungen einzelner Elemente zu Zwecken der Evaluierung und Optimierung stattfinden. Pandemiebedingt fielen diese jedoch erheblich weniger umfangreich statt, als zu Beginn des Projekts prognostiziert. Die Evaluation gelang nur marginal mit Einzelpersonen bzw. Kleinstgruppen von Schülern, Auszubildenden und Studierenden.

Um diesen Rückstand aufzuholen, sollten nach Ablauf der offiziellen Projektlaufzeit im Februar 2022 im Rahmen einer kostenneutralen Verlängerung um weitere sechs Monate bis Mitte August 2022 die bis dahin noch fehlenden Bestandteile der LCA-Plattform ergänzt werden. Anfragen zu Schülerlaborpraktika gab es in diesem Zeitraum einige, aber vor allem zu den Themenbereichen Metalle, Wasser und Lebensmittel, um Praxisrückstände zu curricularen Fachinhalten aufzufangen. Ein Interesse an neuen Unterrichtsinhalten gab es leider nicht.

Tabelle 21: Veranstaltungen zum Thema LCA & Co.

Thema	Teilnehmer
LCA „Milch & pflanzliche Alternativen“	50 SuS, Azubis, Studis, Lehrkräfte & PhDs
LCA „Monobloc“	40 Azubis, Studis, Lehrkräfte & PhDs
LCA „Aluminium“	30 Azubis, Studis, Lehrkräfte & PhDs
LCA „Kartoffeln“	30 Azubis, Studis, Lehrkräfte & PhDs
LCA Energie Tablets	160 SuS OS/Gym, 8-11 Jahrgang

Die Erprobung mit ganzen Lerngruppen konnte Masterabsolvent Phillip Arnold mit einer von ihm entwickelten Unterrichtseinheit zu **Lebenszyklusanalysen im Chemieunterricht am Beispiel ausgewählter Komponenten eines iPads** innerhalb dieses digitalen Vorhabens realisieren. Ziel der Unterrichtseinheit war/ist es, dass Schüler*innen das weitreichende Ausmaß des Energieaufwandes, als Beispiel für ökologische Umweltbelastungen, für ein einzelnes Produkt beschreiben und damit die Bedeutung des Verfahrens einer Lebenszyklusanalyse für ein NE (Nicht Eisen-Element) erklären können. Die entworfene Unterrichtseinheit wurde insgesamt in sieben Lerngruppen an Bremer Schulen im Zeitraum vom 04.-12. Juli 2022 praktisch erprobt. Tab.22 zeigt, um welche Lerngruppen es sich handelte.

Tabella 22: Lerngruppen für die Erprobung des Unterrichtsentwurfes.

Schule	Jahrgang	Kurs	Schüler*innen-Zahl	Bezeichnung
Gymnasium A	Klasse 11	Chemie Grundkurs	♂ 12 ♀ 13	G11-G
	Klasse 11	Chemie Leistungskurs	♂ 13 ♀ 7	G11-L
Gymnasium B	Klasse 9	Chemie	♂ 11 ♀ 8	G9
	Klasse 8	Umwelt/Technik	♂ 14 ♀ 12	G8
Oberschule A	Klasse 10	Chemie	♂ 15 ♀ 10	O10A
	Klasse 9	Chemie	♂ 10 ♀ 11	O9
Oberschule B	Klasse 10	Biologie	♂ 12 ♀ 12	O10B

Die quantitativen Ergebnisse der Lernzielanalyse sind in Abbildung 9 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Schüler*innen-Aussagen sich am häufigsten dem Bereich der Senkung des Energieverbrauchs zuordnen lassen. Die Betonung dieses Aspektes zeigt, dass die Schüler*innen zum Teil noch an dem exemplarischen Beispiel des Energieverbrauchs festhalten. Dies bedeutet, dass sie die Komplexität und Reichweite einer LCA noch nicht erkannt oder verinnerlicht haben. Dass die Kategorie des Industrie-Fortschritts und des Konsums ebenfalls vermehrt angesprochen wurde, hängt vermutlich damit zusammen, dass die Schüler*innen kognitiv noch mit den Ergebnissen der Diskussion beschäftigt sind.

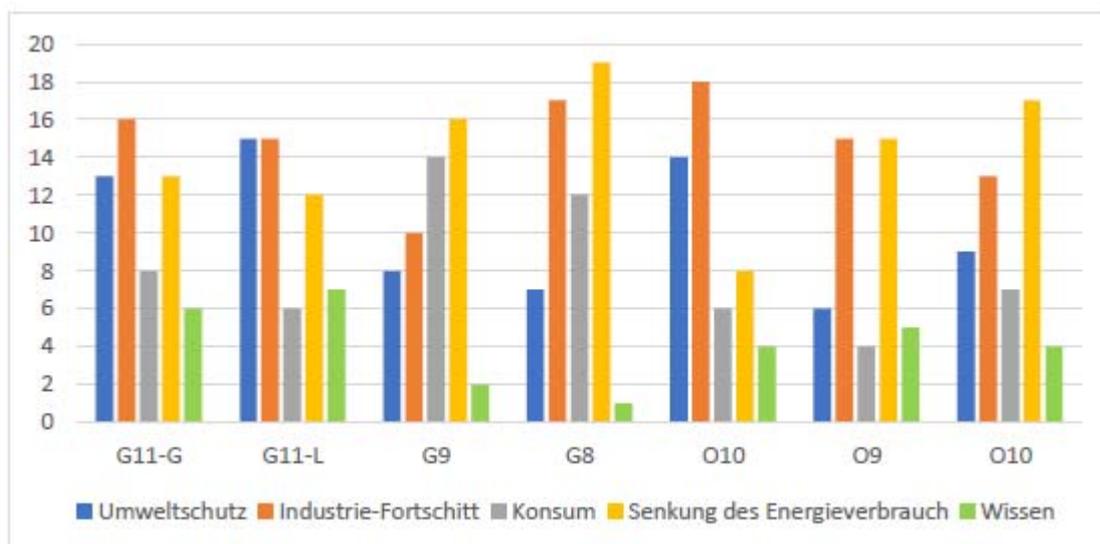


Abbildung 9: Absolute Häufigkeiten der kategorisierten Schüler*innen-Aussagen. Schüler*innen können auch mehrere oder gar keine Kategorie angesprochen haben.

Trotz dieser Abhängigkeit von der spezifischen Thematik ist es der Mehrheit der Lerngruppen gelungen, die Bedeutung einer LCA aus einem übergeordneten Blickwinkel zu betrachten. Gemeint ist die Kategorie des Umweltschutzes. Alles in einem sind alle diese vier Kategorien, aus verschiedenen

Aspekten heraus betrachtet, ein Indiz dafür, dass die Schüler*innen die Bedeutung einer LCA für eine nachhaltige Entwicklung bewusst oder unterbewusst erkannt haben. Zusammengefasst ist der Entwurf dieser Unterrichtseinheit als erfolgreich zu bewerten. Festmachen lässt sich diese Erkenntnis anhand der positiven Ergebnisse aus der Evaluation der didaktischen und methodischen Überlegungen. Sowohl die Ergebnisse aus der Diskussions-Runde als auch der Lernzielanalyse verdeutlichen, dass das Lernziel der Unterrichtsstunde bei der Mehrheit der Schüler*innen erreicht wurde. Zudem zeigte das positive Feedback der Schüler*innen zum methodischen Vorgehen, dass ihnen der Unterricht zugesagt hat. In Bezug auf die Wahl der Lerngruppen ist anzumerken, dass die entworfene Unterrichtseinheit in den höheren Jahrgängen zu einem erfolgreicherem Unterrichtsablauf und qualitativ hochwertigeren Ergebnissen geführt hat als in den unteren Jahrgängen. Während die Schüler*innen der 10. und 11. Klasse teilweise zu einfache Aufgabenstellungen beklagten, war die vorgegebene Zeit für Lernenden der 8. und 9. Klassen trotz des differenzierten Arbeitsmaterials zu kurz.

Aufgrund der Nachfrage der Schüler*innen an einer intensiveren Auseinandersetzung mit dem Thema der Lebenszyklusanalyse wäre es im Rahmen einer weiteren Ausarbeitung sinnvoll, praktische Ansätze zu entwickeln, um das Prinzip der Lebenszyklusanalyse aus einer anderen Perspektive heraus, im Sinne einer Gesamtbetrachtung oder sogar als ganzheitliche Methode in den Schulunterricht zur nachhaltigen Bildung der Schüler*innen zu integrieren.

4.6. Publikationen

Es wurden zwei Aufsätze und ein Poster im Verlaufe der Förderzeit veröffentlicht:

Christian Zowada, Michael Linkwitz, Antje Siol und Ingo Eilks: *Nachhaltigkeit bewerten im Chemieunterricht* CHEMKON, 27,8; 365-372, 2020; DOI: 10.1002/ckon.201900051

Antje Siol, Nicole Voss & Ingo Eilks: *Lernen über Lebenszyklusanalysen am Beispiel Kuhmilch und pflanzliche Alternativen* NIU 2022, angenommen

Antje Siol, Nicole Voss & Ingo Eilks: *LCA meets Efs - Lernen über Lebenszyklusanalysen am Beispiel "Monobloc", Präsentation im Rahmen der GDCh-Tagung im Sept. 2022 in Osnabrück*

4.7. Abgleich zu den erwarteten Erträgen

Auf Basis eines normierten Verlaufsplans gelang eine Harmonisierung des Materials. Einheitlich strukturierte und erheblich reduzierte LCA-Szenarien ermöglichen die Bearbeitung auch komplexerer Produktgruppen. Die Bearbeitung der z.T. komplexen Datenpools mit ihren erforderlichen Harmonisierungen, Normalisierungen und Gewichtungen die recht abstrakten Schadenskategorien und Endpunkte betreffend, ist abgeschlossen. Derzeit sind 33 Modulangebote verfasst worden, die sich in unterschiedlichen Stadien der Evaluierung befinden. Die normierten LCA-Angebote in ihrer digitalen Umsetzung werden nach Überarbeitung nach und nach verfügbar sein.

Bisher konnten mit reduzierten Testkohorten aus 10-15 Teilnehmern (Schüler*innen, Azubis, Studis, Lehrkräfte & PhDs, PostDocs) - mit zwischenzeitlicher Corona-bedingter Stagnation - lediglich sechs Angebote zirkular abschließend evaluiert werden. Sind diese weiteren erfolgreich abgeschlossen, werden auch die Angebote auf der Lernplattform zur Verfügung gestellt, leider ein Jahr später als prognostiziert.

Die Resonanz ist durchgehend (sehr) positiv. Einzig der Zeitaufwand wurde kritisiert. Gewünscht sind aktuelle und zugleich kurze LCA-Angebote, die in 1 max. 2 Doppelstunde/n bewältigt werden können. Das wurde - wenn irgend möglich - umgesetzt.

Zum Winter/Frühjahr des zweiten Projektjahres waren vorläufige des LCA-Angebote für die Umsetzung verfügbar. Bereits in der Entwicklungsphase wurde die Zusammenarbeit mit unseren internationalen Partnern begonnen. Die Implementationspartner aus den USA und Brasilien wirkten unterstützend bei der inhaltlichen Entwicklung, da auch dort einschlägige fachwissenschaftliche Expertise und Erfahrung vorliegt. Die frühzeitige Einbindung sollte die Qualität der Bildungsangebote erhöhen und diese „rund schleifen“. Ein 1. Workshop war für das Frühjahr 2020 geplant, konnte jedoch Coronabedingt nicht stattfinden. Alternativ wurden online-Treffen veranstaltet.

5. Zeitplan

Das Projekt gliederte sich grob in zwei Phasen, die inhaltlich aufeinander aufbauten. Die Übergänge zwischen den beiden Phasen mussten allerdings als gleitend angesehen werden. Im ersten Projektjahr stand die Konzipierung und Materialentwicklung im Vordergrund. Sie war die intensivste Phase in diesem Projekt, denn die Konzeption und Entwicklung sowie die Digitalisierung ausgewählter Tools musste mit Erprobung und Optimierung der Materialien parallel laufen.

Abweichend vom Projektentwurf konnten einige Bestandteile des Vorhabens nicht fertig erstellt werden. Um die Restarbeiten zu erledigen, wurde eine kostenneutrale Verlängerung um weitere 6 Monate bis zum Ende August 2022 bewilligt. Die finale Berichterstattung gelang Ende November 2022.

Die Arbeits- und Zeitplanung zum Vorhaben „GCE meets LCA“ ist in Tabelle 22 dargestellt.

Tabelle 22: Arbeits- und Zeitplan „LCA & Co.“

Teilziele, Aufgaben, Zwischenberichte	2019			2020				2021				2022			
	Quartal	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3
Baustein 1: Grundlagen LCA		→	→	→											
Baustein 2: Datenlage, Software-Tools		→	→	→											
Baustein 3: LCA-Anwendung vereinfacht			→	→	→	→	→								
Baustein 4: LCA-Anwendung komplex			→	→	→	→	→	→	→	→					
Baustein 5: LCA in der Praxis - Synthesen				→	→	→	→	→	→	→	→				
Baustein 6: LCA in der Praxis - Produktentwicklung					→	→	→	→	→	→	→	→			
Baustein 7: Übersetzung					→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
Baustein 8: Digitalisierung, Visualisierung		→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
Schülerlaborangebote (Lehre, Ausbildung)					→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
Arbeitstreffen				x				x							
Öffentlichkeitsarbeit		→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
Zwischenberichte		x			x			x			x			x	ABS

2. Lock down; Notbetrieb der Universität Bremen
kostenneutrale Verlängerung

Die rote Markierung beschreibt den durch die Corona-Pandemie beschränkten Zeitraum, die grüne Markierung zeigt den Zeitraum der kostenneutralen Verlängerung des Projekts.

6. Fazit

Zum Projektabschluss haben in 6 Lehrerfortbildungsveranstaltungen mit 88 Teilnehmern und in 16 Studienseminaren angehender Produktionstechniker, Exkursen der Auszubildenden der chemisch-technischen Lehrberufe und in Schul-Veranstaltungen mit 300 Teilnehmern eines der LCA-Angebote angewendet. Ferner konnten etwa 40 Lehramts-Studierende im Rahmen von Auflagenkursen in Bremen das LCA-Projekt in Theorie und Praxisanteilen kennenlernen.

Zudem konnten 14 Bachelor- und Masterarbeiten im Verlauf dieser drei Jahre zum Vorhaben angefertigt werden. Zwei Publikationen wurden in erziehungswissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht. Ein Poster zum Projekt konnte auf einer GDCh-Fachtagung präsentiert werden. Insofern entspricht der Ertrag dieses Vorhabens nicht gänzlich den Erwartungen. Vor allem pandemiebedingt konnten Schulklassen nicht in gewohnter Weise zur Teilnahme an LCA-Angeboten motiviert werden.

Das Projektkonsortium sieht Verstetigungsbedarf und weiteres Verwertungspotenzial der in diesem Vorhaben entwickelten LCA-Angebote, deren modulare Konzeption mit den entwickelten Daten-Sets. So eignen sich ausgewählte Modulelemente sehr gut für eine Anwendung mit und durch digitale Medien. Auch könnten zwei Teilziele, die in der dreijährigen Laufzeit des Projektes nicht bzw. nur unbefriedigend erreicht wurden, erneut in den Fokus genommen werden: zum einen die Einbindung beruflicher Bildungsträger und Institutionen in dieses Projekt und zum anderen die Promotion der LCA-Angebote in den Lehrerfortbildungszentren und Schülerlaboren an anderen Standorten.

Danksagung:

Wir danken der DBU vertreten durch Frau Melanie Vogelpohl für die finanzielle Unterstützung und das stete Interesse am Fortgang der Arbeit.

Zu Dank verpflichtet sind wir auch einer Reihe von Chemie-Lehramtsstudierenden, die im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten (Bachelor-Arbeiten, Master-Arbeiten, Wissenschaftliche Examensarbeiten) Teilaspekte dieses Vorhabens mit großem Engagement bearbeitet haben.

7. LITERATUR

1. Anastas, P.T., Warner, J.C. (1998). *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford University Press, Oxford.
2. UNCED, Agenda 21. <http://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf> (accessed on 07.11.2014).
3. Centi, G.; Perathoner, S. (2009) From green to sustainable chemistry. In *Sustainable industrial processes*, Cavani, F.; Centi, G.; Perathoner, S.; Trifiro, F., Eds.; Wiley-VCH; pp. 1-72.
4. Cernansky, R. (2015) „Green refill“ Nature, **519**, 379-380
5. World employment and social outlook: Trends 2015 / International Labour Office. – Geneva: ILO, 2015 ISBN 978-92-2-129260-9 (web pdf)
6. <http://www.greenchemistryandcommerce.org/projects/education>
7. Bildungsstandards im Fach Chemie für den Mittleren Schulabschluss. (abgerufen 17.07.2014). http://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Chemie.pdf
8. Brandt, C. (2002). Sustainable Development und Responsible Care. Die chemische Industrie auf dem Weg in eine grüne Zukunft? *ChiuZ* **36/4**, 214-224.
9. Bodner, G. (2014) Green chemistry and sustainability education in the U.S. In *Science education research and education for sustainable development*; Eilks, I.; Markic, S.; Ralle, B., Eds: Shaker: pp. 113-122.
10. Burmeister, M., Jokmin, S., Eilks, I. (2011) Bildung für nachhaltige Entwicklung und Green Chemistry im Chemieunterricht. *CHEMKON* **18/3**, 123–128.
11. Burmeister, M.; Rauch, F.; Eilks, I. (2012) Education for Sustainable Development (ESD) and chemistry education. *Chem. Educ. Res. Pract.* **13**, 59–68.
12. De Haan, Gerhard, *Environ. Edu. Res.*, 2006, **12**, 19-32
13. Karpudewan, M.; Ismail, Z. H.; Mohamed, N. (2011) Green Chemistry: Educating prospective science teachers in education for sustainable development at school of educational studies. *J. Soc. Sci.* **7**, 42-50.
14. Karpudewan, M.; Ismail, Z.; Roth, W.-M. (2012) Ensuring sustainability of tomorrow through green chemistry integrated with sustainable development concepts. *Chem. Educ. Res. Pract.* **13**, 120–127.
15. Klöpffer W. & Grahl B. 2009 Ökobilanz (LCA) Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf WILEY-VCH ISBN: 978-3-527-32043-1
16. Juntunen, M. & Aksela, M. (2014) Improving students' argumentation skills through a product life-cycle analysis project in chemistry education. *Chem. Edu Research Practice*, **15**(4), 488-500
17. Sjöström, J.; Rauch, F.; Eilks, I. (2015) *Chemistry education for sustainability*. In *Relevant chemistry education - from theory to practice*; Eilks, I.; Hofstein, A., Eds.; Sense: Rotterdam, NED,
18. Zuin V. G. (2016) Circularity in green chemical products, processes and services: Innovative routes based on integrated ecodesign and solution systems *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* **2**, 40e44
19. European Commission-Joint Research Centre-Institute for Environment and Sustainability (2010) International Reference Life Cycle Data System (ILCD) handbook: analysing of existing environmental impact assessment methodologies for use in life cycle assessment
20. Das Portal für Labor, R&D, Scale-Up + Chemikalien <http://www.organische-chemie.ch/OC/themen/gruene-chemie.htm>
21. DIN EN ISO 14040:2 & 14.044 (2006): Umweltmanagement – produktbezogene Ökobilanz
22. FH Prof. Dr. Bernhard Zimmer –Vorlesung NaWaRo – Ökobilanzen SS2013 http://www.bifne.de/fileadmin/bifne/userdata/Bilder_und_Grafik/2013-05-22_Zimmer_-_OEkobilanzen_02_-_Vorlesung_TUM_-_bifne_-_Bernhard_Zimmer.pdf
23. <http://www.anthropocene.info/anthropocene-timeline.php>
24. Borjes C, Guzman Barrera NI, Peydecastaing J, Etxeberria I, Vedrenne E, Vaca Garcia C, Thiebaud-Roux S, Sablayrolles C (2017) LCA case study: comparison between independent and coproduction pathways for the production of ethyl and n-butyl acetates *Int J Life Cycle Assess* DOI 10.1007/s11367-017-1317-8
25. Clavreul J, Guyonnet D, Christensen TH (2012) Quantifying uncertainty in LCA-modelling of waste management systems. *Waste Manag* **32**: 2482–2495
26. Meinrenken CJ, Kaufman SM, Ramesh S, Lackner KS (2012) Fast carbon footprinting for large product portfolios. *J Ind Ecol* **16**:669–679
27. Bisinella V, Conradsen K, Højlund Christensen T, Fruergaard Astrup T (2016) A global approach for sparse representation of uncertainty in Life Cycle Assessments of waste management systems. *Int J Life Cycle Assess* **21**:378–394 DOI 10.1007/s11367-015-1014-4
28. Ranke J, König B, Diehlmann A, Kreisel G, Nüchter M, Störmann R, Hopf H (2004) Nachhaltigkeit per Internet NOP – Ein neues organisch-chemisches Grundpraktikum. *Chem. Unserer Zeit*, 2004, **38**, 258 – 266 DOI: 10.1002/ciuz.200400315 und auf <http://www.oc-praktikum.de/nop/>
29. LCA-Datenbanken: www.openlca.org; www.gabi-software.com/deutsch/branchen/chemie-erdol/; www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php; www.eplca.jrc.ec.europa.eu/; www.nrel.gov/lci/