

Vergleich von Softwarelösungen für die Ökobilanzierung – eine softwareergonomische Analyse

Comparison of software solutions for Life Cycle Assessment (LCA)
– a software ergonomic analysis

Lynn Lüdemann
Katrin Feig

Professur Fördertechnik
Institut für Fördertechnik und Kunststoffe
Fakultät für Maschinenbau
Technische Universität Chemnitz

Ökokobilanzierung von Produktsystemen dient der Abschätzung ihrer Wirkung auf die Umwelt. Eine vollständige Lebenswegbetrachtung erfordert auch die Einbeziehung intralogistischer Transportprozesse bzw. -mittel. Für die Erstellung von Ökobilanzen wird i. d. R. ein Computerprogramm verwendet. Die Demoversionen dreier kommerzieller Softwarelösungen (SimaPro, GaBi und Umberto NXT LCA) und die Vollversion einer Open Source Software (openLCA) wurden aus softwareergonomischer Sicht analysiert. Hierzu erfolgte u. a. der Nachbau der bereitgestellten Tutorials bzw. die Modellierung eigener Produktsysteme. Im Rahmen der Analyse wurden die Punkte:

- Entstehung, Verbreitung, Zielgruppe
- Eignung der Tutorials, Erlernbarkeit
- Grafische Benutzeroberfläche, Individualisierbarkeit der Software
- Umsetzung der Anforderungen aus den Ökobilanzierungsnormen
- Notwendige Arbeitsschritte zur Erstellung einer Ökobilanz

einer vergleichenden Betrachtung unterzogen. Der Beitrag beinhaltet eine Einführung in die wesentlichen Prinzipien der Ökobilanzierung und die Grundsätze der Softwareergonomie. Diese werden zu softwareergonomischen Eigenschaften für Ökobilanzsoftwarelösungen subsumiert. Anschließend werden die Ergebnisse des Softwarevergleiches dargestellt. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Erkenntnisse.

[Schlüsselwörter: Ökobilanz, Software, SimaPro, GaBi, Umberto NXT LCA, openLCA]

Life cycle assessment of product systems is used to appraise their impact on the environment. A full life cycle assessment also requires the inclusion of intralogistic transport processes or tools. For the LCA typically a computer program is used. The demo versions of three commercial software solutions (SimaPro, GaBi, Umberto NXT LCA) and the full version of Open

Source Software (openLCA) were analyzed in software ergonomic point of view. For this purpose replicas of the provided tutorials or own product systems were modeled. The interest points were:

- Development, distribution, target group
- Suitability of the tutorials, learnability
- Graphical user interface, individualized ability of the software
- Implementing the requirements of the standards of LCA
- Necessary steps for creating a life cycle assessment

The article includes an introduction to the essential principles of life cycle assessment and the principles of software ergonomics. They are subsumed to software ergonomic properties for LCA software. Later the results of the comparison are presented in the article. A summary of the findings closes the article.

[Keywords: LCA, software, SimaPro, GaBi, Umberto NXT LCA, openLCA]

1 EINLEITUNG

Soll die Umweltwirkung eines Produktsystems berechnet werden, so wird im Allgemeinen dessen Ökobilanz ermittelt. Hierbei wird über den gesamten Lebensweg die potentielle Wirkung des Produktsystems auf die Umwelt untersucht. Der Lebensweg eines Produktes wird heutzutage auch durch innerbetriebliche und zwischenbetriebliche Transportprozesse determiniert. Wie diese Transportprozesse umweltverträglicher gestaltet werden können, ist ein Themengebiet der grünen Fördertechnik (Green Logistic Plant (GLP)). [Eich13]

Die Professur für Fördertechnik an der Technischen Universität Chemnitz forscht deshalb u. a. an der Bereitstellung von nachhaltigen und ressourceneffizienten Systemkomponenten, Systemen und Prozessen für Fördersysteme bzw. Betriebsmittel in der Intralogistik. In Projekten, wie der Entwicklung einer energieeffizienten Förderkette

(vgl. Abbildung 1) bzw. Realisierung eines Gestellsystems für einen Skidförderer aus Wood Veneer Composites (WVC) (vgl. Abbildung 2), wird dieses Themengebiet bearbeitet. Zum wissenschaftlichen Nachweis der verbesserten Umweltwirkung dieser Entwicklungen werden auch deren Ökobilanzen berechnet. Diese dienen zudem der Erstellung von Produkt-Umwelt-Erklärungen oder der Ermittlung des Carbon-Footprints.

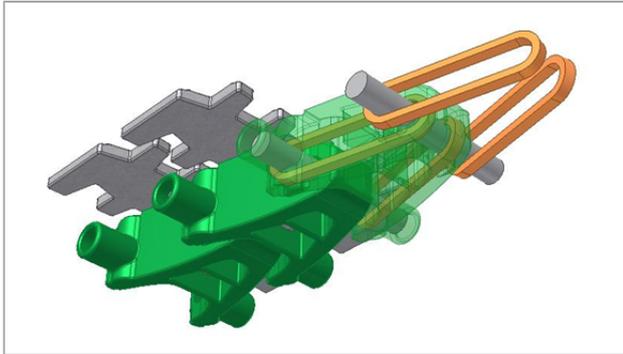


Abbildung 1. Energieeffiziente Förderkette [Lüd13]

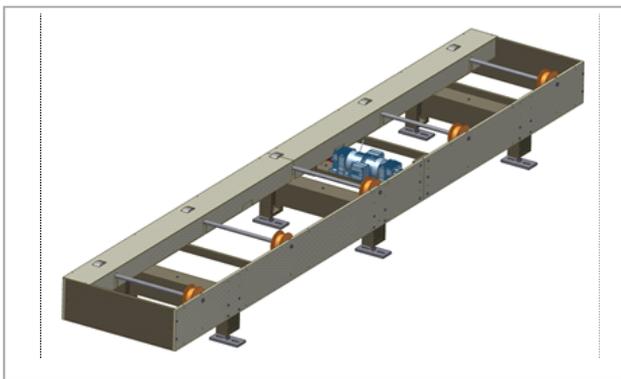


Abbildung 2. Prototyp eines Skidförderers aus WVC [Eck13]

Für die Erstellung einer Ökobilanz werden umfangreiche Daten benötigt. Diese werden gewöhnlich aus Datenbanken entnommen. [Klö09] Für die Modellierung selbst wird oftmals eine Software verwendet. Um ein solches, zumeist kostspieliges Softwaresystem auszuwählen, werden dem potentiellen Anwender kostenlose Demoverionen zur Verfügung gestellt. Mit Hilfe dieser und den angebotenen Schulungsunterlagen bzw. Tutorials, soll der Nutzer eine Auswahl treffen.

Um bewerten zu können, ob die Software in der Lage ist „die besten Früchte bei der geringsten Anstrengung und mit der höchsten Befriedigung [...] zu ernten“ [Her09], wird die sogenannte Softwareergonomie genutzt. Hierbei handelt es sich um die Analyse von Eigenschaften der Software, die dem Nutzer das Erlernen und das Arbeiten mit der selbigen erleichtern sollen. Insbesondere das Erlernen ist bei dem Thema Ökobilanzierung, welches ein eigenes Forschungsfeld darstellt, besonders wichtig.

2 EINFÜHRUNG IN DIE ÖKOBILANZIERUNG

2.1 ANFÄNGE DER ÖKOBILANZIERUNG

Zunächst wurde die Methode der Ökobilanz (Life Cycle Assessment (LCA)), die ursprünglich aus der Schweiz stammt, Sozialbilanz oder gesellschaftsbezogene Rechnungslegung genannt. Sie gilt als eine Kernmethode des Umweltmanagements. Mitte der 1970er Jahre wurden in der Bundesrepublik Deutschland die ersten Produktsysteme (Getränkeverpackungen) ökobilanziell untersucht. In den 1990ern begann die Entwicklung von Standards für Ökobilanzierung und 1997 wurde der erste Standard veröffentlicht. Aktuell gibt es zwei international gültige Standards. Die DIN EN ISO 14040 [DIN14040] definiert die Prinzipien und Methoden der Ökobilanz. In der DIN EN ISO 14044 [DIN14044] werden die Phasen der Ökobilanzierung genauer erläutert.

2.2 DEFINITION

Ökobilanzierung ist eine Methode, um Umweltwirkungen von Produktsystemen zu analysieren. Dabei betrachtet die Ökobilanz diese Wirkungen im Laufe des Lebensweges eines Produktsystems, d. h. von der Rohstoffgewinnung und -erzeugung über die Energieerzeugung bis zur Anwendung, Abfallbehandlung bzw. endgültigen Beseitigung (vgl. Abbildung 3).

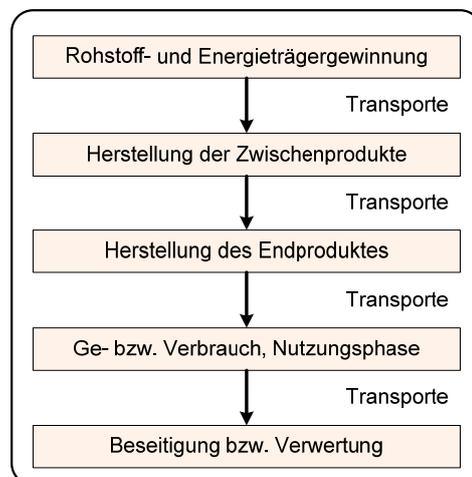


Abbildung 3. Vereinfachter Lebensweg eines Produktsystems [Klö09]

2.3 PHASEN EINER ÖKOBILANZ

Eine Ökobilanz wird in vier Phasen bzw. Schritte unterteilt, welche in Abbildung 4 dargestellt sind.

Eine Ökobilanz ist ein relativer Ansatz, der um eine funktionelle Einheit (fE) aufgebaut ist. Diese definiert sich über die Funktion des Produktsystems. Durch diesen

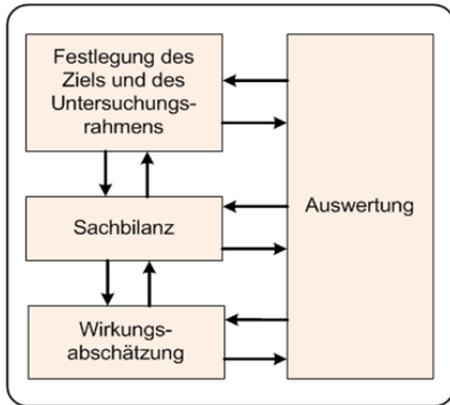


Abbildung 4. Phasen einer Ökobilanz [DIN14044]

Ansatz können auch unterschiedliche Produktsysteme mit gleicher Funktion verglichen werden. [DIN14040] Die fE muss zusammen mit dem Referenzfluss (RF), den verwendeten Allokationsverfahren¹ sowie gewählten System- bzw. Bilanzgrenzen in der ersten Phase (*Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens*) dargelegt werden. Der RF stellt die physische Menge an Inputgrößen (Material bzw. Energie) dar, die zur Erfüllung der Funktion aus der fE resultiert. [DIN14044] Der Zusammenhang zwischen fE und RF sei anhand eines Beispiels demonstriert: Bei einem Vergleich von Glühbirnen mit Energiesparlampen wird als fE sinnvollerweise die Leuchtwirkung bei einer gewissen Raumgröße über eine bestimmte Lebensdauer (bzw. Leuchtdauer) gewählt. Der daraus resultierende RF berechnet sich aus der hierfür benötigten Anzahl von Glühbirnen bzw. Energiesparlampen. [ISO14049] Neben der fE sind die Systemgrenzen der Untersuchung wichtig. Nicht jeder Stoff- bzw. Energiestrom kann/ muss in die Betrachtung miteinbezogen werden, stattdessen erfolgt eine sinnvolle Definition von Abschneidekriterien², die z. B. aus der Umwelrelevanz (oder Masse o. a.) resultieren. [ISO14049]

Beide Größen, fE und RF, dienen als Basis um die In- und Outputs der *Sachbilanz* (Life Cycle Inventory Analysis (LCI)) zu berechnen. Hierzu wird der Lebensweg (Abbildung 3) des Produktes in Prozessmodule unterteilt, für die dann die entsprechenden Input- und Outputströme zusammengestellt und quantifiziert werden. Abbildung 5 stellt ein solches Prozessmodul exemplarisch dar. Die Phase der LCI umfasst die Datenerhebung, Berechnung sowie Allokation von Flüssen und Emissionen für sämtliche Input- und Outputströme der Prozessmodule.

¹ Multi-Input bzw. Multi-Output-Prozesse erfordern, dass Input- bzw. Outputflüsse von Materialien, Energien oder Maschineneinsatz nach bestimmten Kriterien zugeordnet werden. [Klöß09]

² Nur Inputströme, die größer als 1 % sind, werden betrachtet. Zusammen dürfen die weggelassenen Ströme sich jedoch nicht auf mehr als 5 % summieren.

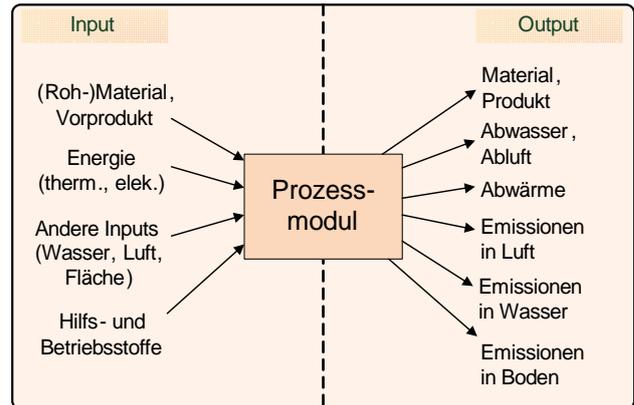
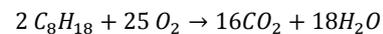


Abbildung 5. Prozessmodul [Klöß09]

Der LCI-Analyse schließt sich die *Wirkungsabschätzung* (Life Cycle Impact Assessment (LCIA)) an. Aus den LCI-Ergebnissen werden Umweltwirkungen berechnet, d. h. den Inputs und Outputs werden, auf Basis sogenannter Äquivalenzfaktoren, bestimmte Wirkungen zugewiesen. Im Allgemeinen werden Stoff- und Energieströme durch technische Prozesse verändert. Resultierende Emissionen werden auf Basis allgemeingültiger naturwissenschaftlicher Gesetze, wie z. B. dem Gesetz von der Erhaltung der Masse oder dem 1. und 2. Hauptsatz der Thermodynamik berechnet. So entsteht bei der Verbrennung von Methan (Hauptbestandteil von Benzin) Kohlendioxid (CO₂) und Wasser (H₂O) nach folgender Formel:



Bei der Verbrennung von einem Liter Benzin bildet sich 2,28 kg Kohlendioxid. [Klöß09] Die LCIA-Phase enthält verbindliche und optionale Bestandteile. Die Auswahl von Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodelle sowie die Zuordnung der LCI-Ergebnisse zu den ausgewählten Wirkungskategorien (Klassifizierung) und Berechnung der Wirkungsindikatorwerte gehören zu den verbindlichen Bestandteilen. Am Beispiel der Wirkungskategorie *Klimaänderung* werden diese Begriffe in der nachfolgenden Tabelle 1 erläutert.

Im letzten Schritt der Ökobilanzierung (*Auswertung*) werden Ergebnisse aus LCI und LCIA in Bezug auf Ziel und Untersuchungsrahmen evaluiert. Hier können die eigenen Ergebnisse mit schon veröffentlichten Studien verglichen und eventuelle Abweichungen und Fehlerquellen analysiert werden. Auch eine Erstellung von weiterführenden Dokumenten aus den LCA-Ergebnissen heraus ist im Rahmen der Auswertungsphase denkbar.

Tabelle 1 Begriffsbeispiel für LCIA

Begriff	Beispiel
Wirkungskategorie	Klimaänderung
LCI-Ergebnisse	Menge an Treibhausgas je fE
Charakterisierungsmodell	Szenario „Baseline“ über 100 Jahre des zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (International Panel for Climate Change (IPCC))
Wirkungsindikator	Verstärkung der Infrarotstrahlung (W/m^2)
Charakterisierungsfaktor	Treibhauspotential (Global Warming Potential (GWP100)) für jedes Treibhausgas
Wirkungsindikatorwert	Kilogramm der CO ₂ -Äquivalente je fE
Wirkungsendpunkte	Korallenriffe, Wälder, Ernten
Umweltrelevanz	Verstärkung der Infrarotstrahlung steht stellvertretend für mögliche Wirkungen auf das Klima, die von der integrierten atmosphärischen Wärmeaufnahme, hervorgerufen durch Emissionen, und dessen Verteilung über die Dauer abhängen.

3 IT-LÖSUNGEN ZUR UNTERSTÜTZUNG DER ÖKOBILANZIERUNG

3.1 ENTWICKLUNG UND AUSWAHL

Die ersten Ökobilanzen wurden noch händisch modelliert und berechnet. Später erfolgte die Erstellung mittels Tabellenkalkulationsprogrammen. Das erste spezielle Anwendungsprogramm zum Erstellen einer Ökobilanz war eine Datenbank (DB)-Erweiterung für ein Tabellenkalkulationsprogramm, welches im Jahr 1985 veröffentlicht wurde. [MB97] Durch die stark angewachsene Datenmenge, immer umfangreichere Produktlebenszyklen und Anforderungen der Politik nach Ausweis der Umweltwirkungen von Produktsystemen, entwickelte sich der Bedarf nach weiteren spezifischen und anwenderfreundlichen Softwarelösungen. Diese existierten zunächst als projektbezogene oder unternehmensinterne Entwicklungen. Zu ihnen gehörten SimaPro, PIUSoecos und Boustead Model. [MB97]

Heute existieren sehr viel mehr Softwarelösungen auf dem Markt. Einen Überblick bietet die Seite des Joint Research Centers (JRC) der europäischen Union [JRC14]. Die für diesen Beitrag ausgewählten kommerziellen Soft-

waresysteme: SimaPro, Umberto NXT LCA und GaBi, sind, nach Ansicht der Autorinnen, marktführend. Sie eignen sich alle zur Durchführung allgemeiner LCA. Sie stehen als Demoversion zur Verfügung und es existieren Tutorials bzw. Handbücher zum Erlernen. Darüber hinaus wird eine Open Source Software analysiert, deren Vollversion frei verfügbar ist. Ziel der Untersuchung ist, neben einem auswahlorientierenden Vergleich, auch Unterschiede zwischen kommerziellen und Open Source Softwarelösungen aufzuzeigen.

3.2 DATENBANKEN IN SOFTWARELÖSUNGEN

Die Integration von Daten in die Software ist eine weitere wichtige Herausforderung. Daten können erhoben und in die Software übertragen oder aus DB automatisch über eine Schnittstelle eingespielt werden.

Solche DB existieren i.d.R. unabhängig von der Software³ und müssen in diese integriert werden. Ökobilanzdaten sind Produkt- bzw. Elementarflüsse, die Umweltwirkungen in Form von Emissionen bzw. Immissionen enthalten. Sie gehen aus Prozessen hervor bzw. sind deren Input. Deshalb sind Datensätze in LCA-DB (teilweise mehrfach) miteinander verknüpft. Die Softwarelösungen müssen Datensätze fehlerfrei verarbeiten und die entsprechenden Verknüpfungen darstellen können. [T12]

Einige dieser DB erhält der Anwender gebührenfrei, andere nicht. Zu den frei verfügbaren DB gehören z. B. die European Reference Life Cycle Database of the JRC (ELCD), National Renewable Energy Laboratory DB (NREL) und die New Energy Externalities Developments for Sustainability (NEEDS). Eine der weltweit führenden kommerziellen DB ist die ecoinvent-DB. Diese enthält mehr als 9000 generische Datensätze zur Energiebereitstellung, Transport, Chemikalien, Werkstoffen und Fertigungsprozessen. Eine weitere kostenpflichtige DB ist die GaBi-Basis-DB, die durch branchenspezifische Zusatzmodule erweitert werden kann.

4 VERGLEICH VON SOFTWARE-SYSTEMEN

4.1 EINFÜHRUNG

Software-Tools sind im Allgemeinen interaktive Werkzeuge, die abhängig von den Eingaben des Benutzers oder von Umgebungsbedingungen ihren internen Zustand ändern und dabei Ausgaben erzeugen. Sie besitzen im Verhältnis zu herkömmlichen Werkzeugen ein „Gedächtnis“ und zeigen neben Funktion und Form ein komplexes „Verhalten“. Dieses Verhalten wird als eigene Teildisziplin der Ergonomie als sogenannte Software-

³ Einige Softwaresysteme haben gebührenfreie DB bereits integriert.

Ergonomie bezeichnet. Software-Ergonomie widmet sich der Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit von interaktiven Computersystemen. [Her09]

Die Verwendung einer Software für Ökobilanzierung lässt sich hierbei auf einige Grundfunktionen reduzieren: Modellierung von Lebenszyklen der zu untersuchenden Produktsysteme, Berechnung und Darstellung der Wirkungsbilanz. Eine Software muss also die Input- und Outputströme innerhalb der definierten Bilanzgrenzen nach den entsprechenden Regeln aufsummieren bzw. berechnen und den Wirkungskategorien zuordnen. Dabei müssen die festgelegten Verteilungsregeln für Koppelprodukte und Recyclingströme unter Anwendung der gewählten Abschneidekriterien innerhalb der Bilanzgrenzen beachtet werden.

4.2 ERGONOMISCHE ANFORDERUNGEN AN SOFTWARE-SYSTEME

Die Normenreihe EN ISO 9241 ff enthält 17 Einzelnormen bzgl. ergonomischer Anforderungen an Geräte und Systeme. Diese betreffen u. a. visuelle Anzeigen und Tastaturen, Arbeitsplatzgestaltung und Körperhaltung. Alle dargestellten Anforderungen sind grundsätzlich unabhängig vom verwendeten System und können bei der Analyse, Gestaltung und Bewertung aller Software-Systeme verwendet werden. Die Beziehungen der 17 Einzelnormen untereinander sind in nachfolgender Abbildung 6 dargestellt.

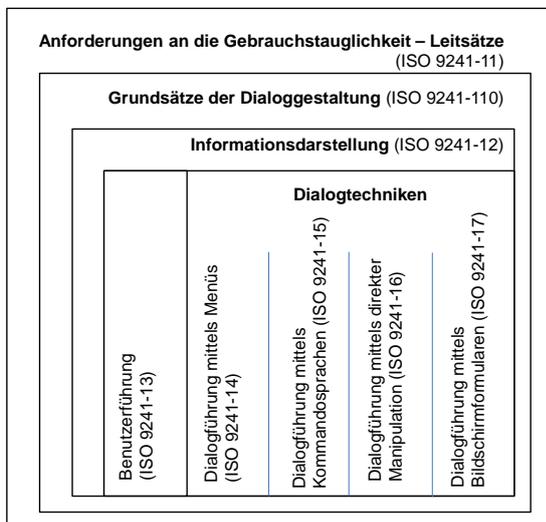


Abbildung 6. Beziehungen der Bestandteile von ISO 9241 zueinander [ISO9241-1]

Die Teile 110 (Grundsätze der Dialoggestaltung) und 11 (Angaben zur Gebrauchstauglichkeit) der ISO 9241 bilden den Untersuchungsrahmen, denn sie stellen übergeordnete Prinzipien der Softwareergonomie dar. Eine weitere Strukturierung von Kriterien der Softwareergonomie betrifft die Schnittstellen zwischen Benutzer und

Rechner. Im IFIP⁴-Modell werden drei Benutzungsschnittstellen konkretisiert:

- Dialogschnittstelle
- Werkzeugschnittstelle und
- Ein-/ Ausgabeschnittstelle

Aus diesen drei Schnittstellen, lassen sich Kriterien/Grundsätze ableiten, die als Ganzes (Kriteriensystem) dazu geeignet sind, interaktive Systeme näher zu untersuchen und zu bewerten. Die *Dialogschnittstelle* (auch ISO 4241-110) spezifiziert dabei ergonomische Grundsätze, die den Dialog zwischen Mensch und Computer beschreiben. Diese Grundsätze sind:

- Aufgabenangemessenheit
- Selbstbeschreibungsfähigkeit
- Steuerbarkeit
- Erwartungskonformität
- Fehlertoleranz
- Individualisierbarkeit
- Lernförderlichkeit

Die *Werkzeugschnittstelle* wird über das Konzept der Gebrauchstauglichkeit spezifiziert. Diese ist definiert als „das Ausmaß, in dem ein Produkt durch bestimmte Nutzer in einem bestimmten Nutzungskontext verwendet werden kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen“ [ISO9241-11]. Gebrauchstaugliche Softwareprodukte sollen den Benutzer zur Erreichung seiner Arbeitsergebnisse befähigen und dabei dessen Belange beachten. Die Leitsätze in ISO 9241-11 können auch dazu benutzt werden, um die Auswahl zwischen bereits vorhandenen Produkten zu unterstützen.

Das Leitkriterium Zufriedenstellung wird in der Norm als „Freiheit von Beeinträchtigungen und positive Einstellungen gegenüber der Nutzung des Produktes“ [DIN9241-11] definiert. Dieses Kriterium ist schwierig zu beurteilen, da es oftmals auf subjektivem Empfinden beruht. Die Zufriedenstellung eines Benutzers hängt von persönlichen Faktoren, wie z. B. von seiner Vertrautheit in der Nutzung der Software, ab. [Her09]

Effektivität ist in der Norm als „die Genauigkeit und Vollständigkeit, mit der ein Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen“ [DIN9241-11] kann, beschrieben. Somit hängt sie von den realisierten Funktionalitäten eines Systems ab und ob diese über die Benutzungsschnittstelle wahr-

⁴ International Federation for Information Processing – Benutzungsschnittstellenmodell.

nehmbar, erreichbar und steuerbar für den Benutzer sind. [Her09]

Als Effizienz wird in der Norm „der im Verhältnis zur Genauigkeit und Vollständigkeit eingesetzte Aufwand, mit dem Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen“ [DIN9241-110] definiert. Die sich daraus ergebenden funktionalen Kriterien werden von Herczeg [Her09] wie folgt aufgelistet:

- Verfügbarkeit
- Zuverlässigkeit
- Wiederverwendbarkeit
- Kombinierbarkeit
- Erweiterbarkeit
- Komplexität
- Transparenz

Die *Ein- und Ausgabeschnittstelle* beschreibt die Fähigkeit des Systems auf Eingaben eines Benutzers zu reagieren und die daraus resultierenden Ausgaben des Systems darzustellen. Folgende Kriterien können aufgelistet werden:

- Wahrnehmbarkeit
- Lesbarkeit
- Unterscheidbarkeit
- Übersichtlichkeit
- Orientierungsförderlichkeit
- Lenkbarkeit der Aufmerksamkeit
- Handhabbarkeit
- Zutraglichkeit

Neben den genannten Kriterien gibt es weitere, die bei Herczeg beschrieben werden, sich nicht dem IFIP-Modell zuordnen lassen. Sie können schon genannte Kriterien ergänzen und sollten für weitere Untersuchungen beachtet werden:

- Multiple Kontexte
- Bediensicherheit
- Direktheit
- Einbezogenheit
- Natürlichkeit
- Intuitivität

Alle aufgelisteten Kriterien sind zur Bewertung von allgemeinen Softwaresystemen definiert. Zur Beurteilung von LCA-Software sollten spezielle Kriterien abgeleitet werden. So sind die Bildschirmaufteilung und Beibehaltung von Parametereinstellungen in LCA-Software relevante Systemfähigkeiten, die sich aus den Forderungen nach Individualisierbarkeit und Steuerbarkeit ergeben.

4.3 HERLEITUNG DES VERWENDETEN KRITERIEN-KATALOGES

Zur Beurteilung von Softwareergonomie kommen verschiedene Evaluationsverfahren zum Einsatz. Es wird zwischen drei Verfahren unterschieden (Theorieorientierte (TE), Aufgabenorientierte (AE) und Benutzerorientierte Evaluation (BE)). In der Regel werden diese Verfahren kombiniert verwendet. Während bei einer TE Prinzipien und Regeln aus Theorien überprüft und bewertet werden, werden bei der AE die Aufgaben, die ein Benutzer mit dem System zu erledigen hätte, in Einzelschritte zerlegt und beurteilt (z. B. Schließen eines Fensters). Die BE zählt zu den wichtigsten Evaluationsverfahren. Sie überprüft und evaluiert z. B. über Reviews, Interviews, Surveys oder Dialogprotokolle das Benutzerverhalten. In der vorliegenden Untersuchung wird auf die TE zurückgegriffen. Aus den allgemeinen Kriterien werden spezielle hergeleitet und für alle Softwaresysteme überprüft.

Ausgehend von der Gebrauchstauglichkeit wird zunächst die Funktionalität (i.e.S. die Berechnungsfunktionalität) betrachtet. Diese muss für den Benutzer wahrnehmbar, zugreifbar und steuerbar sein. Daraus ergeben sich zunächst systemtechnische Voraussetzungen, die zu folgenden Einzelkriterien konkretisiert wurden:

- Hardware-Anforderungen (RAM, Prozessor, Größe der installierten Demoversion), Bildschirm
- Mögliche Betriebssysteme
- Fähigkeit zur Implementierung von externen Datenbanken (z. B. ecoinvent, GaBi-DB, NREL etc.)

Insbesondere das letztgenannte Kriterium stellte sich als Herausforderung für die Softwarehersteller dar. Durch ein Release (Mai 2013) der aktuellen ecoinvent-DB (Version 3 (v3)) mussten softwaretechnische Anpassungen in den jeweiligen Softwaresystemen vorgenommen werden. Dieser Prozess dauerte unterschiedlich lange, so dass die ecoinvent-DB v3 zu verschiedenen Zeitpunkten in den Softwaresystemen nutzbar war.

Die Zufriedenstellung gilt als subjektive Reaktion des Benutzers auf die Interaktion mit dem System, welche sich durch längerfristige Anwendung der Software verbessert. Da bei keinem der genutzten Systeme längerfris-

tige Anwendungserfahrungen bestanden, wurden allgemeine Kriterien zur Beurteilung subsumiert:

- Verwendete Sprache (Sprachauswahl) sowie (geographische) Verbreitung und Nutzung der Software
- Nutzbarkeit der Demoversion → zeitliche Nutzung, Integration von DB, verwendbare Ergebnisse⁵

Eine Software muss zuverlässig und mit angemessenem Aufwand zur Lösung anstehender Aufgaben beitragen (Effizienz). Aus Sicht des Ökobilanzierers müssen die Modellierung der LCI und Berechnung der Wirkungsbilanz mit wenigen, nicht redundanten Klicks durchführbar sein. Konkret wurden folgende Kriterien zur Effizienz beurteilt:

- Modellierung der LCI, Darstellung des Lebensweges
- Berechnung und Darstellung der Wirkungsbilanz
- Verwendung von Allokationsregeln, Parametern und Darstellung der Vorkette
- Implementierung von Charakterisierung, Normalisierung und Gewichtung
- Implementierung von Abschneidekriterien
- Import/ Export von Datensätzen und modellierten Produktsystemen zu anderen Anwendern der gleichen Software
- Import/ Export von LCIA-Ergebnissen in andere Softwaresysteme (Microsoft) und ergänzende Dokumente (EPD⁶, PEF⁷, OEF⁸)

Weitere Kriterien der Funktionalität ergeben sich aus den Anforderungen der Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit, Wiederverwendbarkeit, Kombinierbarkeit, Erweiterbarkeit und Komplexität der Software. Bei der Verfügbarkeit sind neben physikalischen Umgebungssituationen auch Voraussetzungen gemeint, die sich auf die Durchführung von Systemfunktionalitäten beziehen. Für LCA-Software ist die

- Festlegung der fE und des RF

⁵ Der Vollständigkeit halber, müssten hier die Kosten für die Softwaretools erwähnt werden. Die untersuchten Systeme liegen preislich ungefähr gleich auf. Durch mögliche Sonderkonditionen können an dieser Stelle keine verwendbaren Preisangaben gemacht werden.

⁶ Environmental Product Declaration

⁷ Product Environmental Footprint

⁸ Organization Environmental Footprint

sowie die daraus resultierende Berechnungsfunktionalität entscheidend. Werden die genannten Größen vom Benutzer nicht richtig festgelegt oder führt eine falsche Festlegung zu falschen Ergebnissen, so müssen sinnvolle Fehlermeldungen den Benutzer des Systems unterstützen, um diese beiden Bezugsgrößen richtig zu definieren. Folgende Kriterien wurden betrachtet:

- Definition von Subnetzen (Komplexität)
- Implementierung des Produktsystemvergleiches, Unsicherheitsanalyse, Lebenszykluskostenanalyse (Life Cycle Costing (LCC)) sowie Durchführung von Simulationen
- Erstellung eigener Wizards⁹ bzw. Beeinflussbarkeit der Softwareprogrammstruktur

Das Ziel der Dialoggestaltung ist eine Anpassung von Benutzerschnittstellen an die Gesetzmäßigkeiten der Wahrnehmung und geistigen Informationsverarbeitung, um Erlernbarkeit und Benutzerfreundlichkeit zu gewährleisten. [Ber08] Diese sind eng verbunden mit der Selbstbeschreibungsfähigkeit und Aufgabenangemessenheit von Computersystemen. Die Selbstbeschreibungsfähigkeit zählt zu den Hauptkriterien der Dialogförderlichkeit. Eine Benutzungsschnittstelle gilt als unmittelbar verständlich, wenn ihre Bedienung ohne großes Vorwissen gelingt. Gewöhnlich werden jedoch Schulungen bzw. interaktive Unterstützungsinformationen benötigt. Bei der Beurteilung der LCA-Software wurde vor allen Dingen die Bereitstellung der Tools und Werkzeuge zum Erlernen der Software bzw. Prinzipien der Ökobilanzierung beurteilt. Darüber hinaus war es interessant zu erfahren, in wieweit eigene Modellierungen mit den Demoversionen möglich sind. Folgende Kriterien werden daraus hergeleitet:

- Eignung des Tutorials (Aufbau, Verständlichkeit, Dauer, Lerneffekte und verwendetes Produktsystem)
- Weitere Lernsupports (z. B. angebotene Schulungen, Vorhandensein und Nutzbarkeit von Foren und Wikis)
- Möglichkeit zum Anlegen eigener Modelle

Weitere Kriterien resultieren aus den Anforderungen an die Erwartungskonformität, Steuerbarkeit, Fehlertoleranz und Individualisierbarkeit. Folgende konkrete Anforderungen konnten abgeleitet werden:

⁹ Ein Wizard ist eine eigene Programmoberfläche und dient in dem Falle der LCA-Software der Festlegung eines vorgegebenen Bilanzierungsablaufes.

- Verwendung von einschlägigem Vokabular aus den Ökobilanzierungsnormen (Begriffe, Formate)
- Nutzung von speziellen bzw. optionalen Features (copy-and-paste, Undo, Redo, drag-and-drop etc.)

Als letzte Gruppe wurden Ein- und Ausgabekriterien beurteilt. Hierbei wird insbesondere auf die Wahrnehmbarkeit der Ein- und Ausgaben in das System und Handhabbarkeit der Software abgezielt. Eine Informationswahrnehmung aus dem System ist Voraussetzung zur Verarbeitung. Deshalb wurden die oben genannten Kriterien durch

- Möglichkeiten individueller Bildschirmaufteilung (insbesondere durch Vielzahl der Fenster nötig)
- Beurteilung des ersten optischen und graphischen Eindruckes und der Bildschirmaufteilung aus Nutzersicht

umgesetzt. Darüber hinaus werden die

- verwendeten graphischen Objekte sowie deren Anordnungsprinzipien

nach Kriterien wie Übersichtlichkeit, Strukturierung, Verwendung von Zoom-Funktionalitäten usw. beurteilt. Eine weitere interessante Eigenschaft von LCA-Software ist deren Fähigkeit zum verteilten Arbeiten – mehrere Nutzer können dasselbe Produktsystem parallel modellieren und bearbeiten – sowie die Funktionsweise des hierzu notwendigen Datenaustausches.

Um die Zusammenhänge zwischen den erarbeiteten Kriterien zu verdeutlichen, erfolgt in Abbildung 7 eine zusammenfassende Darstellung.

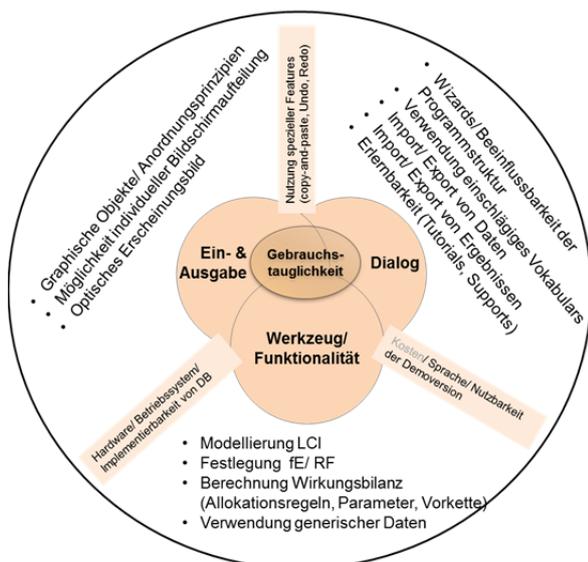


Abbildung 7. Kriterien des Softwarevergleiches [eigene Darstellung]

5 DURCHFÜHRUNG DES SOFTWAREVERGLEICHES

5.1 VORSTELLUNG DER SOFTWARE UND DERER SYSTEMTECHNISCHER VORAUSSETZUNGEN

Auf Basis der kostenfreien Demoversionen¹⁰ der ausgewählten Softwaresysteme (außer openLCA) wurden die genannten Kriterien abgearbeitet. Zunächst werden die Systeme kurz vorgestellt und anschließend die Evaluationsergebnisse präsentiert.

5.1.1 SIMAPRO

SimaPro (aktuelle Version 8.0) wird durch das niederländische Unternehmen Pré Consultants bereitgestellt und hauptsächlich von weltweit agierenden Consultingfirmen verwendet. [Pré13] Die Demoversion kann aus Sicht der Verwendungsdauer unbegrenzt gebraucht werden. Die kalkulierten Ergebnisse können jedoch nur 16-mal gespeichert werden.

Für die Installation der SimaPro-Vollversion müssen folgende Hardwareanforderungen erfüllt sein:

- Windows-Betriebssystem
- Min. 4 Gigabyte (GB) RAM als Arbeitsspeicher
- 10 GB freier Festplattenspeicher (insbesondere für die Verwendung der ecoinvent-DB)
- Mehrkernprozessor
- Empfohlen werden Widescreen Monitor oder die Verwendung von zwei Bildschirmen

SimaPro steht in 14 Sprachen zur Verfügung, dazu gehören u. a. Deutsch, Englisch und Französisch. In der Demoversion sind bereits mehrere kostenlose DB integriert sowie einzelne Datensätze aus der ecoinvent-DB. Durch Vorabintegration der genannten DB ist es dem Anwender möglich, bereits in der Demoversion verschiedene LCA-Szenarien auf Basis der Tutorials oder eigener Produktsysteme zu erstellen. Darüber hinaus sind verschiedene Methoden der LCIA enthalten. GaBi-DB als kommerzielle externe DB können nicht in SimaPro verwendet werden. Die Integration der aktuellen ecoinvent v3 dauerte bis November 2013.

5.1.2 GABI

Das Stuttgarter Unternehmen PE International [Pe13] stellt die Software GaBi¹¹ in der Version 6.2.0.0 bereit.

¹⁰ Wobei diese im Folgenden immer mit ihren vollen Produktnamen angegeben werden. Alle Angaben beziehen sich auf die Demoversionen, außer es wird explizit von der Vollversion gesprochen.

¹¹ GaBi steht für die Abkürzung Ganzheitliche Bilanzierung

Die Demo-Variante beinhaltet Daten aus den firmeneigenen Gabi-DB und aus der ecoinvent-DB. PE-International verwendet hierbei eigene Begriffe und spricht von „ecoinvent XIII“, es ist jedoch nicht ersichtlich, ob diese sich von der aktuellen v3 der ecoinvent-DB unterscheidet.

In der Demoversion sind nur ecoinvent-Datensätze verwendbar, die zur Modellierung der Tutorials benötigt werden. Zusätzlich sind die komplette Datensammlung der NREL und alle von ILCD¹² empfohlenen LCIA-Methoden integriert. Die Demoversion ist für 30 Tage nutzbar. Die Demo- und Vollversion sind in verschiedenen Sprachen (Deutsch, Englisch, Französisch, usw.) verfügbar. Hardwareanforderungen bei GaBi sind identisch denen bei SimaPro.

5.1.3 UMBERTO NXT LCA

Das Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH (ifu) stellt Umberto NXT LCA (UNL) bereit. Dies wird überwiegend von deutschen Universitäten und Forschungsinstituten sowie globalen Consultingfirmen präferiert. [IFU13a] Auch hier kann eine Demoversion der aktuellen Version 7.0 installiert werden.

Wie in SimaPro sind in UNL verschiedene LCIA-Methoden (Abschnitt 5.1.1) inkludiert. Für die Modellierung der Tutorials sind in der Testversion einige Daten von ecoinvent enthalten, jedoch wurden diese verändert und liefern somit keine verwertbaren Ergebnisse. [IFU13a]

Zur Verwendung von UNL benötigt der Computer den gleichen Arbeits- und Festplattenspeicher wie SimaPro. Bei Umberto ist dieser hohe Bedarf an Festplattenspeicher explizit für die Implementierung der ecoinvent-DB v3 ausgewiesen, deren Implementierung seit Mai 2013 möglich ist.

5.1.4 OPENLCA

Im Gegensatz zu den drei vorher genannten Tools ist openLCA [GD13] eine gebührenfreie Open Source Software vom Berliner Unternehmen GreenDelta. Deshalb muss keine Demoversion installiert werden, sondern es kann sofort mit der Vollversion gearbeitet werden. Der Link mit der Installationsdatei befindet sich auf der Hersteller-Website und ist ohne Angabe der persönlichen Daten erhältlich. OpenLCA ist als aktuelle Version 1.4 Beta III seit dem 26.01.2014 verfügbar. Im Gegensatz zu den anderen Softwarelösungen enthält openLCA weder LCIA-Methoden noch Datensätze. Der Nutzer erhält ein leeres Softwaretool, welches er anschließend individuell mit Datensätzen speisen kann.

Das Release der neuen Version wurde notwendig, um die aktuelle ecoinvent-DB v3 verwenden zu können. Diese kostenpflichtige DB muss dazugekauft werden, kann aber auch in anderen Software-Systemen verwendet werden. Die Integration von weiteren kostenpflichtigen Datenbanken, wie die GaBi-DB, ist ebenso möglich. OpenLCA 1.4 erfordert 4 GB Arbeitsspeicher, einen Prozessor mit mind. 2 GHz Taktfrequenz sowie optional einen zweiten Bildschirm. Das Programm läuft unter Windows, Linux und MacOS. Die Integration der ecoinvent-DB erfolgte im Verhältnis relativ spät und in Zusammenarbeit mit potentiellen Nutzern von openLCA, die aufgefordert wurden Fehler und Probleme an GreenDelta zurückzumelden. OpenLCA 1.4 ist nur in Englisch verfügbar.

5.2 WERKZEUGSCHNITTSTELLE/ FUNKTIONALITÄT

Die Effizienz einer Software ist sehr eng mit den Hardwareanforderungen verknüpft. Das heißt, je mehr Speicherplatz ein Programmcode benötigt desto höher ist die dafür benötigte Rechenzeit für die Ausführungen des Programms durch den Arbeitsspeicher. Der Abschnitt beschreibt die einzelnen Schritte, die notwendig sind, bis eine LCA in den jeweiligen Softwarelösungen erstellt wurde.

5.2.1 SIMAPRO

In SimaPro wird zur Erstellung einer LCA zuerst ein neues Projekt angelegt oder ein bestehendes geöffnet. Zur Erstellung der LCI werden im LCA-Explorer (linker Fensterrand) den einzelnen Produktphasen (Baugruppe, Lebenszyklus, Entsorgungsszenario, Zerlegung und Wiederverwendung) die Input- und Outputflüsse zugeordnet. Charakteristisch für SimaPro ist die Verwendung eigener Begriffe.

Die Darstellung des Lebensweges als Baum oder Netzwerk erfolgt erst nach Berechnung des gewählten Szenarios (Abbildung 8). In dieser werden die Lebenszyklusbausteine der gewählten Produktphasen und Prozesse automatisch und farblich differenziert nach ihren Prozessbeiträgen (ebenso Pfeilbreite) aufgegliedert dargestellt. Die graphische Anordnung der Elemente ist nicht veränderbar. Eine Unterscheidung der Lebensphasen ergibt sich durch die von SimaPro unterschiedlichen voreingestellten Farben. Bei der Berechnung der LCIA ist die Verwendung von Allokationsregeln sowie Implementierung von Parametern und Abschneidekriterien (hier Knotengrenzwert) individuell möglich. Die Darstellung des Produktsystems inklusive der zur Herstellung notwendigen Prozessschritte (Vorkette) wird von SimaPro dynamisch auf Basis der flexibel wählbaren Knotengrenzwerte erzeugt. Die Anwendung der optionalen Funktionen Charakterisierung, Normalisierung und Gewichtung ist in SimaPro als eigenes Datenblatt implementiert. In der Developer- und Analyst-Version ist der Import und Export von kompletten Projektstrukturen in andere DB zu weiteren Bearbeitern möglich. Da jedoch nur in einer DB gearbeitet wird,

¹² International Reference Life Cycle Data System

kann normgerecht (nach Masse, Energie, usw.) oder nach erweiterten Regeln durchgeführt werden.

Nach vollständiger Definition des Plans kann zunächst eine LCIA-Vorschau generiert werden, dadurch ist eine Plausibilitätsprüfung der Modellierung möglich.

Die eigentliche LCIA wird als GaBi Balance erstellt. Auf dem von GaBi erzeugten Dashboard erfolgt die Darstellung der LCI- und LCIA-Ergebnisse für das Produktsystem. Die Ergebnisse werden entsprechend der verwendeten Prozessbausteine aufgegliedert. Es kann zwischen prozentualer und absoluter Abbildung gewählt werden. Weiterhin beziehen sich die Werte zum einen auf die Spalten (Prozessbausteine) und zum anderen auf die Zeilen (Flüsse). Dies ermöglicht einen Vergleich der einzelnen Prozesse und Flüsse untereinander und eignet sich somit zur Durchführung von Ökodesign. Die Ausgabe aller Ergebnisse ist auch graphisch möglich.

Zur Spezifikation der Ergebnisse hat der Anwender die Möglichkeit Charakterisierung, Normalisierung und Gewichtung zu nutzen. Zusätzlich können eigene Gewichtungsfaktoren angelegt werden. Eine Bestimmung von Abschneidekriterien ist in dieser Software nicht möglich. Der Datenaustausch ist erst nach Erstellen einer Schnittstelle realisierbar. Produktsystemvergleiche sind nicht im Programm direkt, sondern erst nach Generierung eines „i-report“ möglich. LCIA-Ergebnisse können in MS Excel exportiert werden, ebenso können aus GaBi EPD, PEF und OEF erstellt werden. Des Weiteren sind Monte-Carlo-Simulationen, Sensitivitätsanalysen und Szenarioanalysen durchführbar. In GaBi können jedem Prozess neben LCC-Kriterien auch Life Cycle Working Environment (LCWE) Kriterien zugeordnet werden. Mit Letzteren ist die Durchführung des sogenannten Social Life Cycle Assessment (SLCA) möglich.

Modellierte Pläne können zwischen Anwendern über Import und Export des GaBi eigenen eXchange-Formats (.gbx) ausgetauscht werden. Gleichzeitiges Bearbeiten ist nicht möglich.

5.2.3 UMBERTO NXT LCA

Nach Starten der Software muss auf oberster Ebene ein Projekt neu angelegt oder ein bestehendes geöffnet werden. Weiterhin kann die Vollversion von UNL mit der aktuellen ecoinvent-DB v3 und den GaBi-DB arbeiten, weitere verfügbare DB sind nicht implementierbar. Innerhalb eines Projektes können mehrere LCA-Produktsysteme angelegt werden. Pro Produktsystem wird ein Petri-Netz einer LCA-Analyse dargestellt.

Die LCI eines Modells wird über grafische Elemente wie Pfeile (repräsentieren Verbindungen), Vierecke (Prozesse) und Kreise (Input, Output, Throughput, Storage) erzeugt. Diese werden per drag-and-drop auf die farblich frei gestaltbaren Lebenszyklusphasenfelder gezogen. Rei-

henfolge und Anzahl der Phasen sind nur einmalig festlegbar. Die Input-, Output- und Throughputkreise werden den Prozessen mittels Pfeilen zugeordnet. Anschließend erfolgt eine Zuweisung der Stoffströme zu den jeweiligen Elementen (Abbildung 10).

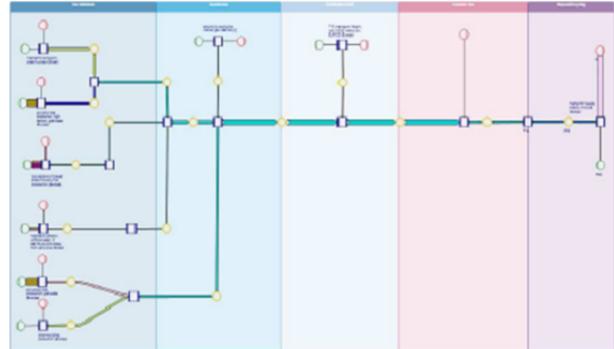


Abbildung 10. Darstellung des Lebenswegs in UNL

Die Zuordnung der Stoffströme im Prozess erfolgt direkt über eine Suchfunktion. Diese Flüsse erhalten auf der Inputseite den Materialtyp „Good“ (grünes Dreieck) und auf der Outputseite werden diese als „Bad“ (rotes Dreieck) bezeichnet. Lediglich der RF und Koppelprodukte erhalten auf der Outputseite den Materialtyp „Good“. Die Festlegung der fE und RF funktioniert in UNL nach zwei Prinzipien: In der ersten Variante versucht die Software den RF automatisch zu identifizieren. Ist dies nicht möglich, erfolgt eine Festlegung durch den Ökobilanzierer (Variante 2). Bei der automatischen Variante überprüft die Software, ob auf der Outputseite ein Materialtyp „Good“ und/ oder ein Materialtyp „Bad“ auf der Inputseite zu finden ist. Sollten diese Materialtypen identifiziert werden, wird in der Nutzungsphase ein „virtueller RF“ (Darstellung als violetter Pfeil zu einem unsichtbaren Outputkreis) für jedes dieser Materialtypen bestimmt. Dieser virtuelle RF wird nicht im Sankey-Diagramm angezeigt und in LCIA-Berechnung mit einbezogen. Sollte eine Prozessspezifikation mehr als einen RF haben, dann müssen Allokationsfaktoren (physikalisch, ökonomisch oder benutzerdefiniert) eingestellt werden. Bei der manuellen Variante muss der Anwender den RF in einem Pfeil (z. B. im letzten Prozess der Produktionsphase oder in der Nutzungsphase) bestimmen. Per drag-and-drop wird das gewählte Material aus der Materialliste (Projekt-Explorer) in den Pfeil gezogen und die Menge der Produkteinheit definiert. Nachdem der RF bestimmt ist, färbt sich auch hier der Pfeil violett.

Die Definition der fE erfolgt in der Materialliste. Diese Angabe kann, wenn noch nicht vorhanden, selbstständig als weiteres Material angelegt werden. Anschließend wird durch Aufrufen der Properties ein Häkchen bei „Material represents Functional Unit“ (Bedienfeld „Units“) gesetzt. Für die anschließende Berechnung werden fE und RF automatisch miteinander verknüpft. Ein besonderes Feature von UNL stellt die "expand"-Funktion dar. Durch sie erfolgt die Darstellung der Vorketten von Prozessmodulen

aus DB, welche bis zu den Elementarflüssen zurückverfolgbar sind. Hierbei können auch die Systemgrenzen individuell festgelegt werden. Weiterhin ist eine Zusammenfassung komplexer Prozesse zu Subnetzen (top-down) möglich. Ebenso können Prozesse durch selbst erstellte Parameter, z. B. für den Transport, beschrieben werden.

Nachdem der Lebenszyklus graphisch modelliert und dessen Elemente verknüpft wurden, kann die Berechnung der LCIA erfolgen. Nach der Berechnung verwandeln sich die Verbindungen in Sankey-Pfeile. Die Ergebnisse der LCIA-Faktoren und aufsummierten Input- und Outputflüsse werden den Lebensphasen zugeordnet. Eine Darstellung der LCIA-Werte erfolgt als Balkendiagramm. Sie werden prozentual oder absolut angezeigt. Weiterhin können die Ergebnisse nach Lebensphasen, Prozessen oder Material sortiert werden. Dadurch wird der Vergleich des Umwelteinflusses erleichtert. Die Ergebnisse können durch Export in MS Excel weiterverarbeitet werden. Neben dem Export in MS Excel kann, nach Erstellung einer Schnittstelle, der Datenexport zur Software SAP R/3 erfolgen. Zudem wird durch UNL das Arbeiten verschiedener Ökobilanzierer an einem System erleichtert. Ein LCA-Produktsystem kann graphisch ausgeschnitten und bspw. auf dem Desktop abgelegt werden. Ein weiterer Nutzer kann dieses Produktsystem dann wiederum graphisch (per drag-and-drop) in sein System implementieren.

UNL beinhaltet keine LCC-Methoden. Ein hierfür geeignetes Softwaretool kann zusätzlich beim ifu erworben werden.

5.2.4 OPENLCA

OpenLCA wird als einziges, der untersuchten Programme, nicht auf dem PC installiert, sondern lediglich als exe-Datei in einem Ordner abgelegt. Nach dem ersten Starten muss zunächst eine DB importiert und anschließend bei jedem neuen Öffnen aktiviert werden. Alle einmal importierten DB sind verfügbar, ein paralleles Arbeiten in mehreren DB ist nicht möglich. OpenLCA enthält auch einen Projekt-Explorer innerhalb dessen nach Flüssen, Prozessen, Methoden, Produktsystemen und Projekten unterschieden wird. Zur Modellierung des Produktsystems müssen enthaltene Prozesse (eigene oder generische aus DB) über Flüsse miteinander verknüpft werden. Die Flüsse werden hierzu der Input- bzw. Output-Seite von Tabellen zugewiesen. In Abbildung 11 ist ein solches Produktsystem dargestellt.

OpenLCA bietet die Möglichkeit Vorketten der modellierten Produktsysteme abzubilden. Die Darstellung kann jedoch unübersichtlich werden, wenn die Vorkette sehr umfangreich ist. OpenLCA erlaubt die Definition von Parametern und verwendet gängige Allokationsmethoden (kausal, ökonomisch, physikalisch). Bei openLCA muss die fE nicht direkt festgelegt werden. Sie ergibt sich aus den Überlegungen des Anwenders und kann in den allgemeinen Informationen beschrieben werden. Die Verknüpfung

der Prozesse erfolgt auf Ebene der Produktsysteme, wo jedem Produktsystem ein Produktfluss zugeordnet wird. Eine Unterteilung des Produktsystems in kleinere Subnetze ist nicht möglich.

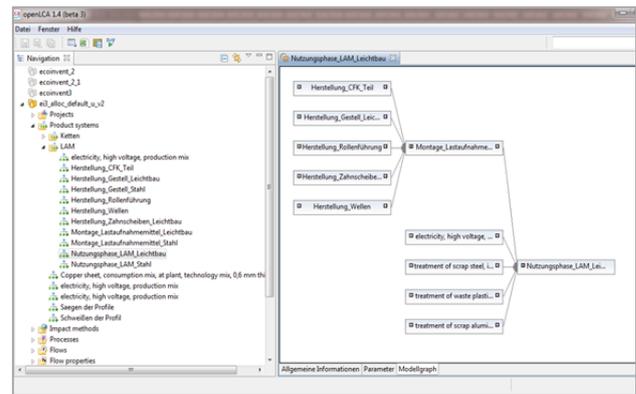


Abbildung 11. Darstellung des Projekt-Explorers und Lebenswegs in openLCA

Vor Berechnung der Wirkungsbilanz müssen die benötigten LCIA-Methoden importiert werden. Vor der Berechnung kann zwischen drei Typen ausgewählt werden: Quick results, Analysis, Monte-Carlo-Simulation. In den Quick results werden nur Ergebnisse der LCI und LCIA dargestellt. Die Zweite liefert zudem bspw. Sankey-Diagramme, Fluss- und Prozessbeiträge, geographische Verteilung. Zur Durchführung einer Monte-Carlo-Simulation muss die Anzahl der Iterationen festgelegt werden. Des Weiteren sind die Methoden Gewichtung und Normalisierung auch bei openLCA implementiert. Hierzu müssen innerhalb der LCIA-Methoden Vorgaben (Sets) angelegt werden. Die Implementierung von Abschneidekriterien erfolgt über eine prozentuale Angabe im Sankey-Diagramm. Auch können die Ergebnisse von openLCA nach MS Excel exportiert werden. Zum Austausch von Produktsystemdaten dient ein openLCA eigenes Datenformat (*.zolca).

Innerhalb der Software ist ein Vergleich von Produktsystemen möglich, indem diese in ein neues Projekt zusammengeführt werden. Die Implementierung von LCC erfolgt über das Anlegen neuer LCIA-Methoden und Festlegung von Outputflüssen verschiedener Kostenarten. Durch Verknüpfung von Input- und Outputflüssen mittels Parametern können auch dynamische LCC-Methoden angewendet werden. Zudem ist es denkbar über den offenen Programmcode die Software einfach an eigene Fragestellungen anzupassen.

5.3 DIALOGSCHNITTSTELLE

Um einen differenzierteren Einblick in die Selbstbeschreibungsfähigkeit der Systeme zu erhalten, wurden die verfügbaren Tutorials durchgeführt und Lernförderlichkeit, bezogen auf Software und LCA-Systematik, beurteilt.

5.3.1 SIMAPRO

SimaPro hat eine englischsprachige sogenannte „guided tour“ in die Demoversion integriert. In dieser wird der Nutzer anhand der Modellierung des Lebenszyklus einer Kaffeemaschine durch das Programm geführt. Dabei werden verschiedene Varianten der Herstellung, Nutzung und Verwertung dargestellt, so dass parallel eine Einführung in die Systematik der LCA und des Life Cycle Engineerings (LCE) erfolgt. Darüber hinaus gibt es u. a. englischsprachige Handbücher zur Einarbeitung in die LCA-Methodik, LCIA-Methodik, Programmierung von Wizards. Zum weiteren Erfahrungsaustausch bietet die Firma GreenDelta kostenlose Webinare in SimaPro an. Über den Hersteller Pré Consultants sind Foren, FAQ, eine Learning-Library und ein Help-Center verfügbar. PRÉ ist bei LinkedIn, Facebook und Twitter vertreten.

Neben der Modellierung des Produktsystems aus dem Tutorial können die vorab implementierten NREL-Datensätze zur Modellierung eigener Produktsysteme genutzt werden. Der Lernförderlichkeit entgegen steht die Verwendung von eigenen nicht genormten Begriffen innerhalb von SimaPro. SimaPro verfügt nicht über die Möglichkeit einmal durchgeführte Modellierungsschritte mittels Undo und Redo rückgängig zu machen oder zu wiederholen. Des Weiteren sind Funktionalitäten, wie copy-and-paste und drag-and-drop, nicht verwendbar aber auch für die Modellierung nicht notwendig.

5.3.2 GABI

GaBi stellt zum Erlernen der Software ein mehrteiliges englischsprachiges Video-Tutorial kostenlos im Internet bereit. Durch implementierte Stopps wird der Nutzer aufgefordert, die vorgeführten Schritte selbst in der Demoversion durchzuführen. Es wird der Lebenszyklus einer Büroklammer analysiert. Dabei erfolgt eine ausführliche Einführung in die LCA-Methode. PE-International bietet zusätzlich sogenannte White-Papers und/ oder kostenlose Webinare zu verschiedenen weiteren Themengebieten an, hierzu zählen u. a. die PEF-Initiative der EU, Fallstudien, Sustainable Product Design usw.

Werden Hilfestellungen zu Themen der Modellierung in GaBi benötigt, kann der Anwender u. a. auf ein User-Forum, GaBi-FAQ, Learning-Center zurückgreifen.

Dadurch, dass in der GaBi Demoversion nur die Datensätze zur Modellierung des Tutorials aktiviert sind, können keine eigenen Produktsysteme angelegt werden. GaBi verwendet das einschlägige Vokabular aus der internationalen LCA-Norm. Die Nutzung von Undo und Redo, copy-and-paste sowie drag-and-drop ist in dieser Software vorgesehen, darüber hinaus listet GaBi die letzten durchgeführten Modellierungsschritte auf.

5.3.3 UMBERTO NXT LCA

Zur Einarbeitung in UNL stellt das ifu ein dreiteiliges Tutorial, ein Handbuch und eine Onlinehilfe direkt in der Demoversion zur Verfügung. Im Tutorial wird die Modellierung des Lebenszyklus von Whiteboardmarker thematisiert. Hierbei wird nur kurz auf die theoretischen Grundlagen der Ökobilanzierung eingegangen. Ausgehend von einem einfachen Modell, ohne Nutzung und Recycling, wird dieses sukzessiv erweitert. Zu jedem erweiterten Modell stehen schon fertige Modelle zur Verfügung, so dass Schritte übersprungen werden können.

Weil UNL fiktive Daten für die Modellierung seines Tutorial verwendet und auch keine weiteren Daten integrierbar sind, können eigene Modelle keine verwertbaren Ergebnisse liefern. Durch die dargestellten Spezifika, bei der Definition von fE und RF sowie Zuordnung der Input- und Outputflüsse zu den graphischen Elementen, traten während der Anwendung Fehlermeldungen auf. Mangels intuitiver Hilfe konnten diese nur mittels Trial-and-Error-Methode beseitigt werden. Um entstandene Fragen aus der Anwendung der Demoversion zu klären, bietet das ifu kostenlose, individuelle Webinare an.

UNL hat die Funktionalitäten von Undo, Redo, copy-and-paste sowie drag-and-drop vollständig integriert. Zur Vernetzung der Umberto-Nutzer und Austausch von Modellierungsfragen zu allen Umberto-Softwaresystemen stellt das ifu ein myUmberto-Forum bereit. Das von UNL verwendete Vokabular basiert auf den einschlägigen Normen zur Ökobilanz.

5.3.4 OPENLCA

GreenDelta stellt auf der Website openLCA.org englischsprachige Video-Tutorials, Wikis, ein User Forum, Manuals und Case Studies bereit. Die Video-Tutorials betreffen die Installation und ersten Schritte mit openLCA 1.3. Sie repräsentieren den Stand von November 2011. Die Manuals betreffen einige spezielle Funktionen von openLCA, wie z. B. Anwendung von Pedigree-Features, Implementierung von LCC und einen User-Guide von openLCA 1.4. Ein eigentliches Tutorial steht nicht zur Verfügung. Allerdings ist ein Tutorial eines Anwenders im Wiki verfügbar. In diesem wird die Modellierung des Lebenszyklus einer Aluminiumdose mit frei verfügbaren NREL-Datensätzen in openLCA erklärt. Darüber hinaus gibt es ein User-Forum, in diesem werden die Fragen durch den Geschäftsführer von GreenDelta selbst und zeitnah beantwortet. OpenLCA nutzt das Vokabular aus der Norm.

Weiterhin können in der aktuellen Version (openLCA 1.4) die angesprochenen Features, wie Undo, Redo usw. genutzt werden. Durch die offene Programmstruktur ist eine direkte Beeinflussung des Programmcodes möglich. Somit können eigene Anwendungen basierend auf der Originalversion programmiert werden.

5.4 EIN- UND AUSGABESCHNITTSTELLE

5.4.1 SIMAPRO

SimaPro wirkt auf den ersten Blick, durch die verwendeten hauptsächlich grauen Farben und der Bildschirmaufteilung wie bei MS Word `98, ein wenig antiquiert. Die Struktur und Aufteilung des Bildschirms ist vorgeben und nicht individuell anpassbar. Sie ist aber von Haus aus sehr geordnet und aufgeräumt. Alle verwendeten graphischen Objekte sind in ihrer Größe und Darstellung fest vorgegeben und werden in einer geeigneten graphischen Auflösung dargestellt. Zudem hat der Anwender die Möglichkeit individuelle Farbeinstellungen, z. B. bei Diagrammen vorzunehmen. Die auf dem Bildschirm angeordneten Objekte und deren Farbgebung sind fix und können nicht individuell verändert werden.

5.4.2 GABI

GaBi wirkt durch die blau-gelbe Oberfläche optisch ansprechend, individuell und modern. Der Hersteller gibt die Aufteilung und Struktur des Bildschirms vor und erlaubt das gleichzeitige Öffnen von mehreren Fenstern. Damit ist der Anwender in der Lage, von Fenster zu Fenster zu springen und das jeweilige aktive Fenster durch Eingabe und Operation zu verwalten. Weiterhin kann der Anwender neben den graphischen Objekten zur Lebenszyklusmodellierung auch die Diagrammdarstellung der LCIA-Ergebnisse individuell anpassen. Somit können an dieser Stelle u. a. die Farben für jedes graphische Objekt selbstständig festgelegt werden.

5.4.3 UMBERTO NXT LCA

Die Oberfläche von UNL ist farblich angenehm gestaltet und wirkt modern. UNL ist ein sehr graphisch orientiertes System. Der Anwender „zeichnet“ und liert“ seine Lebenszyklen auf dem Bildschirm und füllt diese dann mit Daten. Die Oberfläche in UNL teilt sich in vier Fenster: Project-Explorer, Specification-Editor, Net-Editor und Property Editor auf, die jedoch individuell verschiebbar und strukturierbar sind. Der Rahmen ist fix und im Hauptfenster (Net Editor) werden die Produktsysteme grafisch modelliert. Im Project-Explorer werden die Projekte und verwendeten DB aufgelistet. Die Veranschaulichung der LCIA-Ergebnisse erfolgt im Specification-Editor unterhalb des Net Editors, in welchem das Produktsystem angelegt und modelliert wird. Im Property-Editor werden die Eigenschaften des jeweilig ausgewählten Objektes dargestellt. Der Anwender hat die Möglichkeit, alles auf einem Bildschirm darzustellen und zu bearbeiten.

Durch die graphische Ausrichtung der Software kann der Anwender in UNL neben den graphischen Objekten auch auf leere (ohne Parameter) vorgefertigte Bildsymbole (z. B. Transport) zurückzugreifen und diese individuell den Lebensphasen zuordnen. Hierdurch ist eine optisch ansprechende Darstellung von LCA-Berechnungen möglich.

5.4.4 OPENLCA

Angesichts der weißen Oberfläche wirkt das Erscheinungsbild von openLCA zeitlos. OpenLCA besteht aus zwei Fenstern: einem Projekt-Explorer und dem Produktsystemeditor in einem fixen Rahmen. Im Projekt-Explorer werden die vorhandenen und aktivierten DB angezeigt, deren einzelne Objekte ausgewählt werden können. Im zweiten Fenster erfolgt die Modellierung und Berechnung der Produktsysteme. Hierzu werden neue Fenster angelegt. Jedes Fenster enthält Reiter, die wiederum Eigenschaften und Parameter beinhalten. Das Handling erinnert stark an gängige Softwaresysteme, wie z. B. MS Excel und MS Access und ist somit intuitiv erlernbar. Passen die modellierten Produktsysteme nicht auf den voreingestellten Bildschirm werden sie automatisch verkleinert, dadurch werden sie leicht unübersichtlich und sind teilweise nicht mehr lesbar. Die Objekte können per drag-and-drop verschoben werden. Allerdings prägt sich openLCA diese manuelle Anordnung nicht ein, so dass sie verschwunden ist, sobald der Anwender das Fenster verlässt (oder eine Aktion ausführt).

6 SCHLUSSFOLGERUNGEN

6.1 ÜBERBLICK

LCA als Werkzeug, um Umweltwirkungen von Produkten, Prozessen, Produktsystemen und Organisationen bewerten und vergleichen zu können, wird angesichts des Klimawandels und der Umweltprobleme, weiterhin ein wichtiges Forschungsfeld bleiben. Hierzu zählt auch die Ökobilanzierung von Systemen der technischen Intralogistik. Durch die immer komplexeren Lebenszyklen der untersuchten Systeme ist die Nutzung von Software zur Erstellung von LCA unumgänglich. Vor der Anschaffung einer solchen Software ist es sinnvoll deren Einsatzbereiche und Grenzen aufzuzeigen.

6.2 VOR- UND NACHTEILE DER SYSTEME

Mit Hilfe von softwareergonomischen Kriterien kann die Auswahl dieser oftmals kostenintensiven Tools analytisch strukturiert gelingen. Im Artikel wurden geeignete Kriterien systematisch hergeleitet und auf die einzelnen Systeme angewendet. Weiterführend könnte sich ein allgemeiner Nutzertest, z. B. auf der Basis von Fragebögen anschließen.

Jeder potentielle Anwender eines solchen Systems bringt unterschiedliche Erwartungen und Voraussetzungen mit und wird deshalb ein für sich passendes System auswählen. In nachfolgender Tabelle werden nochmals kurz die wesentlichen Merkmale der Systeme aus Sicht der Autorinnen dargestellt.

Tabelle 2 Wesentliche Merkmale der LCA-Softwaresysteme

Software	Wesentliche Merkmale
SimaPro	SimaPro ist ein Pionier unter den LCA-Softwaresystemen und wird hauptsächlich von weltweit agierenden Consultingfirmen benutzt. Es bietet durch drei verschiedene Versionen (Compact, Analyst und Developer) einen abgestuften, individuellen Zugang zum Thema LCA. Bei SimaPro wird der Produktlebenszyklus in einen vorgegebenen Rahmen (Zyklusbaum) modelliert. Diese Vorgehensweise ist gut verständlich, so dass relativ leicht eine LCA erstellt und das Programm unmittelbar und intuitiv verwendet werden kann.
GaBi	GaBi ist vom Umfang ähnlich wie SimaPro. Es wird aber nicht in Versionen unterschieden. GaBi ist deutlich graphischer orientiert. Die LCA wird nicht in einem Rahmen definiert sondern auf einem Plan modelliert. Die Auswertung/ Darstellung der LCIA-Ergebnisse ist sowohl horizontal als auch vertikal möglich. GaBi stellt ein umfangreiches Tutorial zur Verfügung, welches einen guten Einblick in die Theorie der LCA bietet. GaBi ist modular aufgebaut und kann um diverse zusätzliche Features erweitert werden. Zusätzlich ist eine Durchführung von SLCA ¹⁴ möglich. Die Software wird hauptsächlich von großen Industrieunternehmen genutzt und ist auf die Darstellung von LCA von Prozesstechnologien spezialisiert.
UN	UNL wird viel von Universitäten und Forschungsinstituten verwendet. Es ist ein stark graphisch orientiertes System, bei welchem die Produktlebensläufe zunächst im Net-Editor mittels Symbole gezeichnet und dann mit Stoffströmen unteretzt werden. Die Festlegung der fE und des RF kann automatisch oder manuell erfolgen. Bei einer fehlerhaften Festlegung von fE und RF kann die LCA nicht berechnet und zeitaufwendige Korrekturen müssen durchgeführt werden. UNL eignet sich gut für die Präsentation von Forschungsergebnissen aufgrund der optisch ansprechenden Modellierung. UNL kann als einziges System die gebührenfreien DB nicht integrieren. Verteiltes Arbeiten ist sehr komfortabel möglich.

openLCA	Ist als einziges Tool kostenlos aber nur in Englisch verfügbar. Es kann sofort im Rahmen der Nutzung von freien DB eingesetzt werden. Alle weiteren kommerziellen DB können gegen Entgelt implementiert werden. Die Nutzung von openLCA erfordert ein tiefes Detailwissen über die Theorie zur LCA. Der Anwender muss dieses Wissen und die Nutzung der Software selbst erlernen bzw. über Foren erfragen. Es existieren keine aktuellen Tutorials oder Handbücher. OpenLCA eignet sich sehr gut für den akademischen Bereich bzw. die Forschung, weil es durch seine offene Programmstruktur an eigene Fragestellungen angepasst werden kann.
---------	--

6.3 ZUSAMMENFASSUNG

Letztendlich sind alle untersuchten Softwaresysteme in der Lage die geforderten Funktionalitäten bereitzustellen und eine LCA zu erstellen. Eine Kaufentscheidung wird letztendlich immer individuell getroffen werden müssen. Wie in Tabelle 2 dargestellt, bietet jedes System Vor- und Nachteile. Die größten Unterschiede zwischen den Softwarelösungen liegen:

- in der graphischen Benutzeroberfläche und dem Modellierungsrahmen
- den notwendigen Arbeitsschritten zur Modellierung der Ökobilanz
- in den implementierten Features (Erweiterungsmöglichkeiten)

Die zu treffende Entscheidung resultiert hauptsächlich aus der fokussierten Zielgruppe und den geplanten Anwendungsbereichen. Bei allen Softwaretools zeigte sich, dass unterschiedliche Vorkenntnisse zur LCA-Methode für die Modellierung von einfachen Produktsystemen notwendig sind. Hierzu ist die Durchführung der angebotenen Tutorials hilfreich. Die Unterschiede diesbezüglich wurden im Text aufgezeigt.

Literatur

- [Ber08] Bernotat, R.: Das Forschungsinstitut für Anthropotechnik–Aufgaben, Methoden und Entwicklung. In: Schmidt, L.; Schlick, C. M.; Grosche, J.: Ergonomie und Mensch-Maschine-Systeme, Springer Verlag, Berlin, 2008.

¹⁴ Social Life Cycle Analysis, d.h. Berücksichtigung von sozialen Arbeitsbedingungen, die bei der Produktion auftreten, z. B. Kinderarbeit.

- [DIN14040] DIN ISO EN 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen, Ausgabe 11.2009, Beuth Verlag, Berlin.
- [DIN14044] DIN ISO EN 14044: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen, Ausgabe 07.2006, Beuth Verlag, Berlin.
- [DIN9241-11] DIN EN ISO 9241-11:1998: Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten, Anforderungen an die Gebrauchs-tauglichkeit – Leit-sätze, Beuth Verlag, Berlin, 1999.
- [DIN9241-110] DIN EN ISO 9241-110: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung (ISO 9241-110:2006); Deutsche Fassung EN ISO 9241-110:2006, Beuth Verlag, Berlin, 2008.
- [Eck13] Eckardt, R.: Anwendung erneuerbarer Werkstoffe in der Intralogistik, Automotive Cluster Ostdeutschland GmbH (ACOD), Workshop „Praxisnahe Forschung und Entwicklung intralogistischer Systeme“, 2013.
- [Eich13] Eichhorn, S.; Clauß, B.; Nendel, K.; Gehde, M.: Entwicklung eines kompletten Trag- und Gleitprofils aus WPC (Wood Polymer Composite) für ein Hängefördersystem, IN: Tagungsband Technomer 2013, 23. Fachtagung über die Verarbeitung und Anwendung von Polymeren, S.61, urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-129718
- [Gab13] Springer Gabler Verlag (Herausgeber), Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort: Monte-Carlo-Methode, online im Internet: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/137904/monte-carlo-methode-v5.html>
- [GD13] GreenDelta: Website GreenDelta. URL: www.greendelta.com/Home.56.0.html?&L=ocvgiirz [12.12.2013]
- [Her09] Herczeg, M.: Software Ergonomie. Theorien, Modelle und Kriterien für gebrauchstaugliche, interaktive Computersysteme, 3. Auflage, Oldenbourg Verlag, München, 2009.
- [IFU13a] Institut für Umweltinformatik Hamburg: Website ifu Hamburg. URL: www.ifu.com/de [12.12.2013]
- [IFU13b] Institut für Umweltinformatik Hamburg: Umberto (v7.0) User Manual, Version 2.05, Hamburg, 2013
- [IFU13c] Institut für Umweltinformatik Hamburg: Umberto (v7.0) Tutorial 1 of 3, Version 1.2, Hamburg, 2013
- [ISO14049] ISO/TR 14049:2012: Environmental management – life cycle assessment – Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to goal and scope definition and inventory analysis, Technical Report, Beuth Verlag, Berlin.
- [JRC14] Joint Research Centre: Website JRC. URL: <http://lca.jrc.ec.europa.eu/ResourceDirectory/toolList.vm> [12.02.2014]
- [Klö09] Klöpffer, W.; Grahl; B.: Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2009.
- [Lüd13] Nendel K, Lüdemann L, Weise S (2013). Energieeffizienzbetrachtungen logistischer Systeme. Logistics Journal, Vol. 2013. (urn:nbn:de:0009-14-37717)
- [PE13] PE International: Website PE International. URL: www.pe-international.com/deutsch/index/?gclid=COHgrpeJhbsCFQlb3god_lwAjg [12.12.2013]
- [Pré13] PRé Consultants: Website PRé Consultants. URL: www.pre-sustainability.com, [12.12.2013]
- [Ro08] Rogall, H.: Ökologische Ökonomie: Eine Einführung, 2. Auflage, VS Verlag für Sozialwissenschaften, Berlin, 2008.
- [T12] Troy, S.: CO2-freier Kohlestrom durch Einsatz von Carbon Capture and Storage und Biomasse-Mitverbrennung, Lit Verlag, Berlin, 2012.

AUTORINNEN

Dipl. Wirt.-Ing. Lynn Lüdemann, Mitarbeiterin an der Professur Fördertechnik der Technischen Universität Chemnitz, u. a. im Projekt eniPROD (Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen für die Produktion)

Wirt.-Ing. Katrin Feig (M.Sc.), Mitarbeiterin an der Professur Fördertechnik der Technischen Universität Chemnitz, beschäftigt sich mit der Ökobilanzierung von modularen Bauweisen von Maschinenteilen aus Holzwerkstoffen.