

1 Einleitung

„Hip und Grün – Unternehmen setzen verstärkt auf Nachhaltigkeit – Die Jugend demonstriert gegen den Klimawandel, die Grünen sind im Umfragehoch. Für Deutschlands Firmen wird ein ökologisches Image immer wichtiger.“ [1] Diese Schlagzeile vom 17.08.2019 im Karriere Portal des Handelsblattes spiegelt den aktuellen Zeitgeist der deutschen Industrie kurz und knapp wider. Nicht nur in Deutschland lässt sich beobachten, wie die Industrie sowohl aufgrund von Vorgaben und Gesetzen als auch aus eigenem Antrieb die Themen Klimaschutz und Nachhaltigkeit vorantreibt.

Seitens der Europäischen Union existieren Verordnungen, die ihren Mitgliedsländern sowohl die Meldung von Treibhausgasen als auch politische Maßnahmen zum Erreichen von Klimaschutzziele vorgeben. Dies mündet in Gesetzen, wie z. B. das erst im Dezember 2019 in der BRD verabschiedete Gesetz zur Senkung der Treibhausgasemissionen in verschiedenen Sektoren. Demnach sind für den Industriesektor in 2020 max. 186 Mio. t emittierte CO₂-Äq zulässig, eine Summe, die bis 2030 um ca. 25 %, gesenkt werden muss. [2] Dies bedeutet für die deutsche Industrie eine große Herausforderung und zwingt die Unternehmen, sich intensiv mit den Themen Energie- und Ressourceneffizienz auseinanderzusetzen.

Viele Unternehmen beteiligen sich u. a. genau aus diesem Grund freiwillig an Vereinigungen, wie z. B. SPIRE¹ [3], in denen die Stärkung der Industrie in Europa durch eine Verbesserung von Prozessen und der Reduzierung des Energie- und Ressourcenverbrauchs sowie der Abfallmengen angestrebt wird. Diese Bestrebungen zielen auf die Reduzierung des Energiebedarfes der Prozessindustrie um 30 % und der primären, nicht erneuerbaren Rohstoffintensität um 20 %. Daraus resultierend wird eine Verbesserung der Effizienz des CO₂-Fußabdrucks um 40 % bis zum Jahr 2030 im Vergleich zum Zeitraum 2008...2011 angestrebt. [4] Auch auf deutscher Ebene existieren solche Initiativen, wie z. B. CHEMIE³, die die Integration des Themas Nachhaltigkeit als Leitbild in der Chemischen Industrie anstrebt.

Ein besonderer Fokus dieser Thematik liegt momentan auf den Umweltwirkungen der Produktionen. Um die Umweltwirkungen zu erfassen, stellt die Ökobilanzierung ein mögliches Instrument dar. Für die Ermittlung eines sogenannten Umweltaußendruckes existiert eine Vorgehensbeschreibung in Form einer Leitlinie, die u. a. die EU für die Bewertung von Produkten oder auch Organisationen empfiehlt [5]. Diese Empfehlung ist begründet mit verschiedenen Erwägungen, u.a. um zu verhindern, dass der aktuell irreführende „Wildwuchs an unterschiedlichen Methoden und Initiativen zur Bewertung und Offenlegung von Umweltleistungen“ [6] keinen vertrauensvollen Umgang mit Umweltleistungsdaten zulässt. Für Unternehmen fallen hohe Kosten an, wenn sie ihre Produkte bzw. Organisationen nach verschiedenen Methoden bewerten lassen müssen, um Anforderungen von Geschäftspartnern, Behörden, Investoren, etc. zu erfüllen. [6] Bezogen auf den einzelnen Produktionsprozess entspricht dies einer Prozessökobilanz, die nach Jacquemin et al. [7] verschiedene Funktionen übernehmen kann. Dazu gehören z. B. eine Verbesserung von Prozessen durch die Identifizierung von Abschnitten mit hohen ökologischen Auswirkungen oder das Management von Prozessen durch Vergleich der Ergebnisse mit einem Referenzprozess oder anderen zuverlässigen Ergebnissen.

Die Branche der chemischen Industrie gehört zu den energie- und emissionsintensivsten in Deutschland, bedingt zum einen durch hohen Energie- und Wärmebedarf und dem damit verbundenen Bedarf an fossi-

¹ Sustainable Process Industry through Resource and Energy Efficiency

len Rohstoffen sowie zum anderen durch die Edukte und Hilfsstoffe auf Basis fossiler Rohstoffe wie Erdgas und Erdöl [8]. Einen wesentlichen Anteil am Produktionswert der chemischen Industrie nimmt mit einem Anteil von 25,5 % das Produktionsgebiet der Spezialchemie ein [9]. Dieser Industriezweig bedient i. d. R. die Nachfrage nach Spezialitäten vorrangig im B2B-Umfeld, die in einem Umfang von mehreren 100 kg bis 1000 t pro Jahr produziert werden. 2017 exportierte die Branche Produkte im Wert von 55 Mrd. € [10]. Aufgrund der wachsenden Herausforderungen zum einen bedingt durch die gesetzlichen Forderungen als auch zum anderen durch die sich verändernden Wettbewerbsbedingungen steht dieser Industriezweig unter Druck, die Umweltperformance seiner Produktionen stetig zu verbessern. Im gleichen Maße muss die Entwicklung neuer Technologien und Produkte vorangetrieben werden, da die teilweise hochspezialisierten Erzeugnisse aufgrund dynamisch wachsender Märkte nur kurze Lebenszyklen aufweisen. Typisch sind dabei auch häufige Produktmodifikationen bedingt durch Forschungsaktivitäten.

Aufgrund der kleinen Produktionsmengen und dem häufig veränderten Produktportfolio kommen in der Spezialchemie häufig Mehrprodukt- und Mehrzweckanlagen zum Einsatz, die i. d. R. absatzweise bzw. in Kampagnen betrieben werden. Der Vorteil dieser Produktionsanlagen besteht darin, dass verschiedene Prozesse nacheinander oder auch zeitgleich in der Anlage betrieben werden können. Dieses hohe Maß an Flexibilität erlaubt eben jene notwendige schnelle Reaktion auf veränderte Marktanforderungen, häufig verknüpft mit der Nachfrage nach kleinen, individuell gefertigten Mengen. [11] Die ökologische Bewertung von Produktionsprozessen in Mehrprodukt- oder Mehrzweckanlagen ist aufgrund der Charakteristika in Struktur und Betrieb des Anlagentyps im Vergleich zur Produktion von Bulkchemikalien in Monoproduktanlagen mit einer Vielzahl von besonderen Herausforderungen verbunden. Im Wesentlichen lassen sich diese in zwei Bereiche zusammenfassen: Erstens, die Ermittlung und Zuordnung der Verbrauchsdaten zu den einzelnen Produktionsprozessen und Produkten und Zweitens, die Erfassung von ökologischen Aufwendungen, die durch die Anlage und deren Betrieb verursacht werden. Letztgenanntes umfasst in diesem Zusammenhang sowohl die Berücksichtigung der ökologischen Aufwendungen als auch deren Zuordnung zu einem einzelnen Prozess.

Diese Arbeit zielt darauf ab, eine Methode für die ökologische Bewertung von Produktionsprozessen, die in Mehrprodukt- und Mehrzweckanlagen betrieben werden, zu entwickeln. Die Grundlage dazu bildet die Bereitstellung einer geeigneten Datengrundlage zu den Verbräuchen der einzelnen Produktionsprozesse und zur Produktionsanlage selbst, die möglichst alle notwendigen Inputs und Outputs transparent wieder spiegelt. Nur so können Daten für Stakeholder, wie z. B. Kunden oder staatliche Institutionen, generiert und auch für interne Zwecke eine verlässliche Datenbasis geschaffen werden. Diese soll die Möglichkeit bieten, sowohl Potentialanalysen hinsichtlich der Energie- und Ressourceneffizienz durchzuführen als auch die Ableitung von Verbesserungsansätzen in der Produktion bzw. für einzelne Prozesse zu erlauben.

Die Arbeit ist strukturiert in sechs Kapiteln, siehe Abb. 1.1. In Kapitel 2 werden der grundlegende Aufbau von Ökobilanzen sowie die Erfassung von potentiellen Umweltwirkungen dargestellt. Aufbauend darauf erfolgen die Beschreibung der Prozessökobilanz und die Ermittlung dazu notwendiger Verbrauchsdaten mit dem Schwerpunkt Mehrzweckanlagen sowie einer Übersicht zu dem Umgang mit Produktionsanlagen in der ökologischen Bewertung von Produktionsprozessen. Das Kapitel schließt mit der Einordnung dieser Arbeit. Kapitel 3 präsentiert mit dem 3-Ebenen-Modell einen Modellierungsansatz und eine Modellierungsumgebung zur Abbildung von Produktionsprozessen unter Berücksichtigung der gesonderten Herausforderungen, die mit der Abbildung von absatzweise betriebenen Prozessen in Mehrzweckanlagen verbunden sind. Anhand einer Sensitivitätsstudie wird der Einfluss einzelner Apparate-, Betriebs- und Prozessparameter auf die Ermittlung von Verbrauchsdaten belegt. Die Ergebnisse werden in Kapitel 5 im Rahmen einer Sensitivitätsstudie zum Einfluss solcher Parameter auf die Ergebnisse einer ökologischen Prozessbewertung aufgegriffen und eingeordnet. In Kapitel 4 stehen die Struktur und Produktionsumgebung von Mehrzweckanlage sowie die daraus resultierenden Anforderungen für die Zuordnung der ökologischen Aufwendungen zu den einzelnen Produktionsprozessen, die durch die Produktionsanlage selbst

verursachten werden. Es wird ein Ansatz vorgestellt, der sowohl die Erfassung der Mehrzweckanlage im Rahmen einer ökologischen Bewertung als auch die Berücksichtigung der Lebensdauer und die damit verbundenen potentiellen Umweltwirkungen für Instandhaltung umfasst. Außerdem werden Allokationsansätze zur Zuordnung der anlagenbedingten ökologischen Aufwendungen vorgestellt. Schlussendlich wird der Ansatz an einer Mehrzweckanlage der Fa. Merck KGaA am Standort Darmstadt, Deutschland, angewandt und diskutiert.

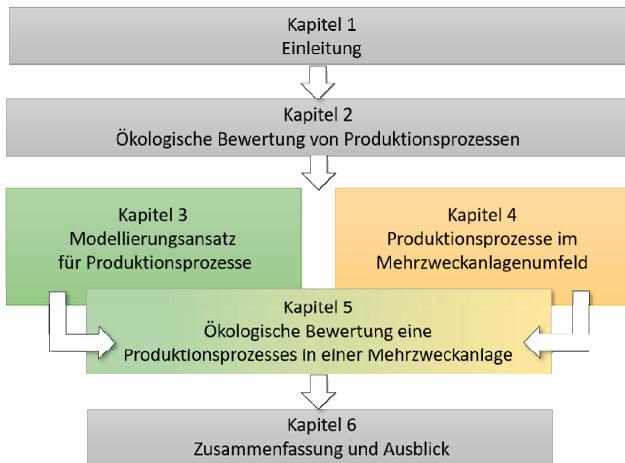


Abb. 1.1: Struktur der Arbeit

Das Kapitel 5 umfasst die Anwendung der in Kapitel 3 und Kapitel 4 vorgestellten Ansätze zur Modellierung und Integration der Produktionsanlage in die ökologische Bewertung von Produktionsprozessen, die in Mehrzweckanlagen betrieben werden. Dies erfolgt anhand eines konkreten Prozesses aus dem Umfeld der Spezialchemie, der orientiert an den Anforderungen der DIN EN ISO 14040/44 bewertet und hinsichtlich Verbesserungsansätzen sowie Potentialen analysiert wird. Das Kapitel schließt mit der Auswertung der Ergebnisse und dem Aussprechen von Empfehlungen zur Verbesserung der ökologischen Performance. Abschließend erfolgen in Kapitel 6 eine Zusammenfassung und ein Ausblick hinsichtlich weiterführender Untersuchungen.

Die gezeigten Ergebnisse resultieren aus Forschungsarbeiten, die im Rahmen des vom BMBF geförderten Forschungsprojekts "Innovative Apparate- und Anlagenkonzepte zur Steigerung der Effizienz von Produktionsprozessen – InnovA²⁴" (Förderkennzeichen 033 RC 1013 A) ermöglicht und in Zusammenarbeit mit der Fa. Merck KGaA mit Sitz in Darmstadt, Deutschland durchgeführt wurden. Die Fa. Merck stellte die Daten und Informationen zu der hier im Detail betrachteten Mehrzweckanlage, den darin betriebenen Prozessen sowie weitere benötigte Angaben zur Verfügung.

2 Ökologische Bewertung von Produktionsprozessen

Der Begriff *Ökobilanz* wurde erstmals in den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts durch das damalige Bundesamt für Umweltschutz in der Schweiz verwendet [12]. Eine der ersten konkreten Definitionen erarbeitete 1993 die Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) im Rahmen eines Workshops im April 1993 in Sesimbra, Portugal, in dessen Rahmen der „Code of Practice“ veröffentlicht wurde. Dieser enthielt neben einer Definition des Begriffes Life Cycle Assessment (LCA) u.a. Rahmenbedingungen sowie Anwendungen und beschrieb den damaligen Stand der Technik. [13] Vier Jahre später erfolgte für den deutschsprachigen Raum eine Normung beim Deutschen Institut für Normung (DIN), die im Laufe der Jahre immer wieder angepasst wurde und aktuell in der internationalen Norm 14040 den Begriff für die Lebenszyklusanalyse eines Produktes wie nachfolgt definiert: „Die *Ökobilanz* bezieht sich auf die Umweltaspekte und potenziellen Umweltwirkungen (z. B. Nutzung von Ressourcen und die Umweltauswirkungen von Emissionen) im Verlauf des Lebensweges eines Produktes von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung, Recycling bis zur endgültigen Beseitigung (d. h. „von der Wiege bis zur Bahre“).“ [14] Aktuell existiert eine Vielzahl von Methoden und Initiativen zur Bewertung und Veröffentlichung von Umweltleistungen. Aus diesem Grund wurde von der Europäischen Kommission eine Methodik vorgegeben, mit der Umweltwirkungen von Produkten über den gesamten Lebenszyklus bewertet werden sollen. Dies soll zum einen die Bewertung und Kennzeichnung der Produkte deutlich erleichtern und zum anderen das Vertrauen in Umweltdaten stärken. [5] Solch einen typischen Lebenszyklus eines Produktes mit verschiedenen Lebenszyklusstationen ist in der Abb. 2.1 skizziert. Einen Überblick über die bedeutendsten Stationen der Entwicklung hin zum heutigen Verständnis zum Thema *Ökobilanz* findet sich in dem Buch „Life Cycle Assessment – Theory and Practice“ [15].

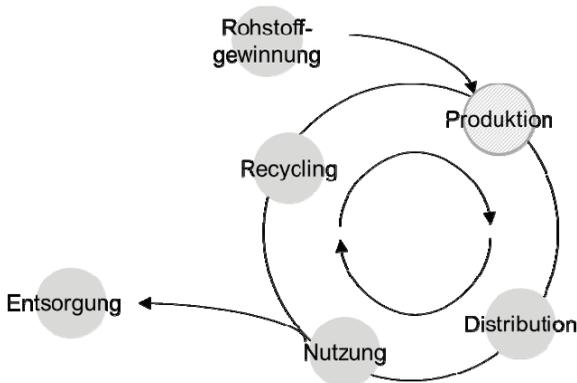


Abb. 2.1: Lebenszyklus eines Produktes (von der Wiege bis zur Bahre – cradle-to-grave)

In diesem Kapitel wird zunächst auf die wesentlichen Elemente einer *Ökobilanz* eingegangen und verschiedenen Standards, Leitlinien, Handbücher sowie Normen hinsichtlich der Vorgaben zur Erfassung von potentiellen Umweltwirkungen bezogen auf den Lebenszyklusabschnitt „Produktion“ untersucht.

Anschließend erfolgt eine detailliertere Betrachtung zur Prozessökobilanz und die Beschreibung des in dieser Arbeit verwendeten Ansatzes zur Erfassung von Verbrauchsdaten. Verschiedenen, in der Literatur existierende Vorgehensweisen werden vorgestellt und eingeordnet sowie auf die Berücksichtigung der Produktionsanlage in der ökologischen Bewertung von Produktionsprozessen eingegangen. Schlussendlich erfolgt eine Einordnung dieser Arbeit.

2.1 Aufbau einer Ökobilanz

In Abb. 2.2 sind die mit dem Erstellen einer Ökobilanz verbundenen, zu erarbeiteten Sachverhalte dargestellt – vergleichend die Vorgaben in der Leitlinie der EU zur Erstellung eines Produktumweltfußabdrucks (product environmental footprint – PEF) und in der internationalen Norm, die i. d. R. in der Literatur als Standard herangezogen werden. Die EU-Leitlinie unterteilt das Vorgehen in fünf verschiedene Schritte: Zieldefinition, Festlegung Untersuchungsrahmen, Ressourcennutzungs- und Emissionsprofil, Wirkungsabschätzung sowie Auswertung und Berichterstattung. In der Norm sind vier Phasen angegeben, da die Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen in einem Schritt zusammengefasst werden, sich inhaltlich von den Angaben in der EU-Leitlinie aber grundlegend nicht unterscheiden. Im Wesentlichen sind die Vorgaben in der Leitlinie konkreter und das Vorgehen genauer beschrieben. Ist das Vorgehen in der Norm als iterativ beschrieben, so setzt die EU-Leitlinie die Reihenfolge fest und sieht keine nachträgliche Anpassung einzelner Inhalte, wie z. B. Systemgrenzen, vor.

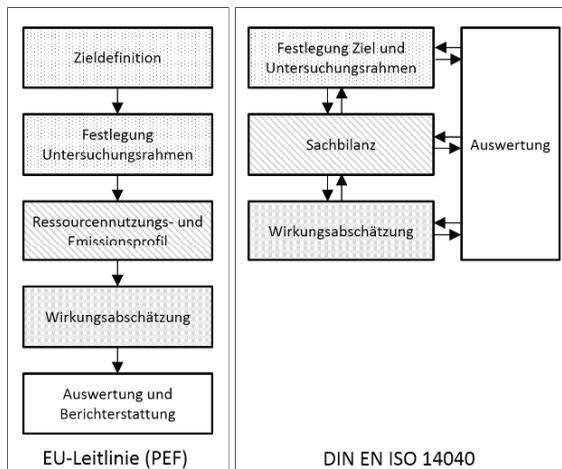


Abb. 2.2: Phasen einer Ökobilanz: links nach Vorgaben der EU-Leitlinie für einen product environmental footprint (PEF) [5], rechts nach DIN EN ISO 14040 [14]; inhaltlich ähnliche Phasen der beiden Vorgaben sind entsprechend durch Staffierung und Farbe gekennzeichnet.

Die Phase *Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen* umfasst u. a. Angaben zur beabsichtigten Anwendung und zur Zielgruppe. Außerdem ist eine konkrete Formulierung des Untersuchungsrahmens und damit z. B. der funktionellen Einheit² vorgegeben. Außerdem sind die Systemgrenzen festzusetzen, an denen die Inputs und Outputs des betrachteten Produktsystems/ Prozesses erfasst werden. Hinzu kommen

² Die funktionelle Einheit stellt in der ökologischen Bewertung die Größe dar, auf die sich die betrachteten Inputs und Outputs und damit die potentiellen Umweltwirkungen beziehen.

Angaben zu den zu untersuchenden Umweltproblemfeldern (Wirkungskategorien, WK) als auch die für die Wirkungsabschätzung herangezogenen Charakterisierungsmodell sowie Allokationsregeln, die festlegen wie die Umweltwirkungen z. B. auf die funktionelle Einheit und evtl. vorhandene Nebenprodukte verteilt werden.

Die Erstellung der *Sachbilanz* bzw. des *Ressourcennutzungs- und Emissionsprofils* stellt das Kernstück und den aufwendigsten Teil der Ökobilanz dar. In dieser Phase müssen alle Inputs und Outputs des zu untersuchenden Systems erfasst werden. Dies bedeutet zunächst das Zusammentragen und Erfassen aller benötigten Daten sowie bei Lücken zu treffenden Annahmen. Anschließend erfolgt die Übertragung der Input- und Outputströme in Elementarflüsse³, z. B. durch Nutzung generischer Datensätze aus Datenbanken wie *ecoinvent* [16]. Dieser Schritt dient der Erstellung der eigentlichen Sachbilanz, die in Summe alle mit dem Produktsystem/Prozess zusammenhängenden Ströme aus der und in die Umwelt repräsentiert.

In der Phase der *Wirkungsabschätzung* erfolgt die Verknüpfung zwischen den Elementarflüsse aus der Sachbilanz und ihren potentiellen Umweltwirkungen. Für die im Vorfeld festgelegten Umweltproblemfelder werden dazu über gewählte Charakterisierungsmodelle sogenannte Wirkungsindikatorwerte ermittelt. Ein Wirkungsindikatorwert repräsentiert die Summe der ökologischen Aufwendungen in einer WK, die aus den zugeordneten Inputs und Outputs resultieren. Mittels der Charakterisierungsfaktoren werden die Elementarflüsse auf einen Referenzstoff (z. B. Kohlenstoffdioxid, CO₂) bezogen, der die Umweltwirkung repräsentiert. Die verschiedenen Charakterisierungsmodelle sind i. d. R. in Bewertungsmethoden zu finden. Die Vorgaben in der internationalen Norm sind dazu wagen und geben lediglich eine Empfehlung bzgl. der zu betrachtenden Umweltproblemfelder. In der Leitlinie der EU hingegen sind sowohl die Umweltproblemfelder als auch die zu nutzenden Charakterisierungsmodelle vorgegeben.

In der letzten Phase, der *Auswertung*, erfolgt die Analyse und Ergebnisdarstellung sowie das Ableiten von Schlussfolgerungen und Empfehlungen. Ebenfalls Bestandteil dieser Phase sind u. a. Prüfungen bzgl. Zuverlässigkeit, Vollständigkeit und Sensitivitäten.

Die kurze Beschreibung der einzelnen Phasen dient an dieser Stelle dem Überblick und erhebt nicht den Anspruch einer vollständigen, detaillierten Beschreibung zu den Arbeitsschritten und Anforderungen. Im nachfolgenden Kapitel werden verschiedene Literaturquellen vorgestellt, die das Vorgehen bei einer ökologischen Bewertung behandeln. Für nähere Erläuterungen zum Aufbau einer Ökobilanz bzw. dem Vorgehen sei an dieser Stelle auf diese Quellen verwiesen.

Bezog sich der Begriff Ökobilanz ursprünglich auf Produkte und deren Lebensweg, wird dieser seit einigen Jahren auch für die Umweltbewertung u. a. von Dienstleistungen, Unternehmen oder Verhaltensweisen verwendet [17]. Bereits 1997 unterteilten die Autoren Hilty und Rautenstrauch [18] im Zuge der Betrachtung von betrieblichen Umweltinformationssystemen Ökobilanzen nach verschiedenen Untersuchungsschwerpunkten in *Produktökobilanz*, *Betriebsökobilanz* und *Prozessökobilanz*. Der Betrachtungsrahmen der Produktökobilanz umfasst in diesem Zusammenhang die Umweltbelastungen, die ein Produkt über seinen Lebensweg verursacht, siehe Abb. 2.1. Im Vergleich dazu stellt die Betriebsökobilanz eine periodenbezogene Betrachtung sämtlicher Inputs und Outputs eines Betriebes bzw. die Prozessökobilanz eine Input-/Output-Analyse bezogen auf einen Produktionsprozess dar, siehe den in Abb. 2.1 straffierten Lebenszyklusabschnitt *Produktion*. [18]

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den Prozessökobilanzen, also der ökologischen Bewertung von einzelnen Produktionsprozessen mit Schwerpunkt stoffwandelnde Industrie. Nachfolgend wird dazu ein Überblick über existierende Vorgaben sowie die darin enthaltenen Ansätze und Hinweise zur Erfassung der

³ Elementarflüsse sind Stoff- und Energieströme, die direkt aus der Umwelt entnommen (z. B. Erze) oder in diese abgegeben werden (z. B. Abwärme).

ökologischen Aufwendungen, die mit dem Lebenszyklusabschnitt Produktion zusammenhängen, gegeben. Neben verschiedenen Beispielen aus der Industrie und Forschung wird ein Ansatz zur Erfassung sämtlicher Inputs und Outputs eines Produktionsprozesses vorgestellt, der in dieser Arbeit Anwendung findet. Neben den eigentlichen Produktionsprozessen liegt ein weiterer Schwerpunkt auf dem Input Produktionsanlage, dessen Lebenszyklus und den daraus resultierenden Umweltwirkungen.

2.2 Vorgaben zur Erfassung von potentiellen Umweltwirkungen

Für das Vorgehen zur Erfassung von ökologischen Aufwendungen wurden in den letzten ca. 30 Jahren verschiedene Standards, Leitlinien, Handbücher und Normen erarbeitet. Diese liefern in unterschiedlichen Detaillierungsgraden Anweisungen, Anhaltspunkte und Hinweise, welche Aspekte und Faktoren bei der ökologischen Bewertung von Produkten, Unternehmen etc. zu berücksichtigen sind. Im Folgenden werden verschiedene Publikationen vorgestellt. Diese werden mit Fokus auf „Produktion“ als Lebenszyklusabschnitt eines Produktes bzw. im Unternehmen und den damit verbundenen Vorgaben zur Bewertung von Produktionsstätten bzw. -anlagen zusammengefasst.

Ecological Footprint Standards 2009

Die „Ecological Footprint Standards 2009“ (EFS) dienen der Sicherstellung einer in der Community vorgeschlagenen „Best Practise“ zur Ermittlung eines konsistenten ökologischen Fußabdruckes. Der ökologische Fußabdruck beschreibt in diesem Zusammenhang nach wissenschaftlichen Prinzipien die zur Verfügung stehenden natürlichen Ressourcen und Biokapazitäten im Verhältnis zur Nachfrage der Bevölkerung [19]. Die Standards umfassen neben der Analyse auch die Kommunikation der Ergebnisse und wurden entworfen für alle Fußabdruckstudien subnationaler Art, die sowohl die Bevölkerung als auch Produkte oder Unternehmen betreffen. Ziel ist es, eine einheitliche Bewertung der ermittelten Fußabdrücke im Hinblick auf Genauigkeit, Vollständigkeit und Transparenz zu gewährleisten. [20] Die EFS wurden von einem Konsortium, bestehend aus Vertretern von Hochschulen, Regierung- und Nicht-Regierungsorganisationen sowie Consultingunternehmen, entwickelt. Die Idee des Modells zu den „Ecological Footprints“ und die Gründung des „Global Footprint Network“ im Jahre 2003 stammen vom Schweizer Mathis Wackernagel [21, 22].

Die Standards zur Erfassung von Produkten stellen zwei Ansätze zur Berechnung des ökologischen Fußabdrucks eines fertigen Endproduktes vor: Die prozessbasierte Ökobilanz (P-LCA) und die auf Umwelteffekte erweiterte Input-Output-Bilanzierung (EEIO-LCA). Der Ansatz der P-LCA ermöglicht eine detaillierte Darstellung, da im Vergleich zur Input-Output-Analyse, gezielt einzelne Produkte betrachtet werden können. Im Vergleich dazu ist der EEIO-LCA Ansatz allgemeiner gefasst und sieht typischerweise keine Betrachtung einzelner Produkttypen vor. Als Vorteil wird hingegen dargestellt, dass die Produktionskette „Upstream“ vollständig abgedeckt werden kann, was bei der P-LCA im Allgemeinen nicht möglich ist [20]. Detaillierte Angaben, welche Aspekte in den einzelnen Lebensphasen und somit auch für die Bewertung eines Produktionsprozesses zu berücksichtigen sind, werden in den Standards nicht gegeben. Bezüglich der Erfassung von ökologischen Aufwendungen, die im Zusammenhang mit Produktionsanlagen stehen, finden sich keine Vorgaben. Die Standards verweisen allerdings bei der Ermittlung von neuen P-LCA Daten, wenn also für einen Lebensabschnitt eines Produktes nicht auf Datensätze aus Datenbanken zurückgegriffen werden kann, auf die Einhaltung der Vorgaben in den Normen DIN EN ISO 14040/44.

DIN EN ISO 14040/44

Die DIN EN ISO 14040 und 14044 gehören zu der Normenfamilie, die das Umweltmanagement beschreibt. Die aktuellen Versionen beider Normen wurden vom CEN 2006 angenommen, wobei die DIN EN ISO 14040 die Normen DIN EN ISO 14040:1997, 14041:1998, 14042:2000 und 14043:2000 ersetzt.

Die DIN EN ISO 14040:2006 beschreibt die Grundsätze und Rahmenbedingungen, die bei der Erstellung einer Ökobilanz zu berücksichtigen sind. Sie beschreibt keine Methodik und liefert auch keine Hinweise, welche Methoden in den einzelnen Phasen der Ökobilanz zur Anwendung kommen sollen. Im Zusammenhang mit dem Festsetzen der Systemgrenzen, die für das zu bewertende Produkt⁴ gelten, wird allerdings beispielhaft auf verschiedene Prozessmodule verwiesen. Diese Prozessmodule stellen die kleinsten Abschnitte im Lebenszyklus eines Produktes dar, wie z. B. „Herstellung von Betriebsstoffen“, für die Input- und Outputdaten zur Erstellung der Sachbilanz zu generieren sind. [14] Eines der benannten Prozessmodule umfasst die „Herstellung, Wartung und Außerbetriebsetzung der Produktionsanlagen“. Konkrete Vorgaben, wie und in welchem Umfang die Produktionsanlagen zu erfassen sind, liefert die Norm allerdings nicht.

Die DIN EN ISO 14044:2006 beschreibt, basierend auf den Vorgaben der DIN EN ISO 14040, eine Methodik bezogen auf die zu erfüllenden Anforderungen sowie eine Anleitung zur Erstellung einer Ökobilanz. Inhaltlich liefert diese Norm konkrete Vorgaben, wie und welche Inhalte in den einzelnen Phasen der Ökobilanz zu erarbeiten sind. Dies umfasst u. a. auch das Vorgehen bei der Datenerfassung, bei der Durchführung von Allokationen, bei der Auswahl der Wirkungskategorien und Charakterisierungsmodelle sowie Vorgaben zu den Beurteilungen, z. B. in Hinblick auf die Datenqualität. Hinzu kommen Angaben zu Abschneidekriterien sowie durchzuführende Prüfungen z. B. bzgl. Konsistenz, Sensitivität, Vollständigkeit etc. Methodisch sind zur Erfassung der Produktionsstätte für die Bewertung auch in dieser Norm keine Angaben vorhanden. Zu einem Produktionsprozess sind konkrete Vorgaben zu Inputs und Outputs aufgeführt, wobei die Produktionsanlage in diesem Zusammenhang nicht benannt ist.

Handbuch der Ökobilanzierung

Der Leitfaden „Environmental Life Cycle Assessment of products. Guide and Backgrounds“ wurde 1992 vom Centre for Environmental Sciences – Leiden University (CML) in Zusammenarbeit mit der Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO) und dem Fuels and Raw Materials Bureau (Bureau B&G) erarbeitet. In den darauffolgenden Jahren folgten viele, vor allem methodische Entwicklungen [23], die im Rahmen eines fünfjährigen Forschungsprojektes „LCA in environmental policy“⁵ (1997-2001) in einen überarbeiteten Leitfaden integriert wurden. Die Erstellung des neuen Leitfadens mit dem Titel „Handbook on Life Cycle Assessment. Operational Guide to the ISO Standards.“ erfolgte federführend durch das CML, unterstützt durch das Institute of Environmental Studies (Vrije Universiteit – IVM), der School of Systems Engineering, Policy Analysis and Management (Delft University of Technology – TUD/TB), Bureau B&G, dem Interfaculty Department of Environmental Science (University of Amsterdam – UVA), der IVAM-Environmental Research, TNO und der 2.-0 LCA Consultants.

Für die Erstellung von Ökobilanzen wurde neben den Angaben zu den Inputs und Outputs nach den in der DIN EN ISO 14041⁶ genannten Datenkategorien, die Erfassung von Equipment in dem neu entwickelten Leitfaden vorgegeben. Als mögliches Vorgehen zur Erfassung von Anlagegütern bei unsicherer Datenla-

⁴ Der Begriff „Produkt“ dient in der ISO EN DIN 14040/44 als Oberbegriff für vier verschiedene Kategorien: Dienstleistungen, Software, Hardware und verfahrenstechnischen Produkte.

⁵ gefördert von Niederländischen Ministerien: Ministerium für Wohnungsbau, Raumordnung und Umwelt sowie dem Ministerium für Wirtschaft, dem Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Fischerei und dem Ministerium für Verkehr, Öffentlichkeitsarbeit und Wassermanagement

⁶ Die DIN EN ISO 14041 wurde ebenso wie die Norm 14042 und 14043 2006 in die DIN EN ISO 14040 und 14044 überführt.

ge wurde der Ansatz von Erwin Lindeijer⁷ vorgeschlagen. Der Untersuchungsansatz von Lindeijer zielt auf die Erfassung der Gebäude – ohne Maschinenpark – ab und dient einer ersten Abschätzung der ökologischen Auswirkungen, die durch Anlagegüter verursacht werden. Die Bewertung basiert auf nur wenigen Daten, wie bebauter Oberfläche, Höhe der Anlage, jährliche Produktionsmenge oder Lebensdauer [nach 23].

Die Abschätzung der ökologischen Aufwendungen kann dabei auf drei verschiedenen Stufen erfolgen, abhängig von den zur Verfügung stehenden Daten [nach 23]:

1. Basierend auf den durchschnittlichen Umweltwirkungen je m³ Gebäudevolumen unter Berücksichtigung der bebauten Oberfläche und Höhe der Anlage (bzw. gesamte Gebäudevolumen) sowie der jährlichen Produktion des Unternehmens.
2. Basierend auf den Umweltwirkungen verschiedener Bauelemente unter Berücksichtigung der bebauten Oberfläche und Höhe der Anlage, der jährlichen Produktion und dem Bodenbelag der Anlage.
3. Basierend auf den Umweltwirkungen verschiedener Bauelemente und der gesamten Bodenfläche, Gebäudefläche und Gebäudevolumen sowie der abgeschätzten Massen von Maschinen und Equipment, der Art und Größe des Bodenbelags in der Anlage, der erwarteten Lebensdauer des Gebäudes, des jährlichen Energiebedarfs (wenn möglich) und der jährlichen Produktion des Unternehmens.

Die Recherchen der Autoren des Handbuchs zeigen, dass in LCA-Studien die Anlagegüter sehr oft abgeschnitten werden, ohne deren Relevanz in den Untersuchungen zu berücksichtigen. Abschneiden bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die ökologischen Aufwendungen, die mit den Anlagegütern selbst einhergehen, in der Bewertung nicht erfasst werden. Zu diesen Aufwendungen gehören u. a. die Bereitstellung der verbauten Materialien, der Bau der Apparate und des Equipments, der Rückbau der Anlagen oder die damit verbundenen Transportwege.

Im Handbuch wird vorgeschlagen, dass bei Anlagegütern eine Orientierung an den Abschneidekriterien für zu erfassende Inputs und Outputs erfolgen sollte und damit Produktionsanlagen inklusive zugehöriges Equipment in jeder LCA-Studie zu berücksichtigen sind. Die in dem Handbuch differenzierten drei Ansätze zur Reduzierung oder Vermeidung von Abschneidung (Nutzung Input-Output-Modelle [24, 25], Sekundärdaten ähnlicher Module aus Datenbanken, wie z. B. ecoinvent [16], sowie festgelegte allgemeingültige Abschneidekriterien, wie z. B. in DIN EN ISO 14044 [26] verweisen auf Abschätzungen, um auftretende Datenlücken zu kompensieren. Eine konkrete Vorgabe bzw. Hinweise auf welcher Basis eine Abschätzung zu erfolgen hat oder wie die Lebensdauer der Anlage in die Betrachtung zu integrieren ist, werden nicht gegeben.

Greenhouse Gas Protocol (GHG – Protocol)

Das GHG-Protocol (Treibhausgas-Protokoll) ist ein vom World Resource Institute (WIR) und World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) entwickelter Standard zur Berichterstattung über Treibhausgasemissionen [27]. Dieser Standard wird von vielen Unternehmen der deutschen Industrie zur Ermittlung der eigenen Treibhausgasemissionen angewandt, die diese der Öffentlichkeit z. B. im jährlichen Corporate Responsibility Bericht präsentieren - vorrangig für die direkten (Scope 1) und indirekten (Scope 2) Luftemissionen. Zu den direkten Emissionen zählen Treibhausgasausstöße, die u. a. unmittelbar bei der Verbrennung fossiler Energieträger (z. B. Erzeugung Strom, Dampf) und bei Prozessen freigesetzt oder durch den Fuhrpark verursacht werden. Die indirekten Emissionen umfassen Treibhausgasfreisetzungen, die u. a. bei der Bereitstellung der zugekauften Energien (z. B. Strom, Heißwasser, Fernwärme) auftreten. Diese Angaben finden sich u. a. in den seit 2017 gesetzlich vorgeschriebenen jährlich zu verfassenden Corporate Responsibility Reports bzw. in der Umweltberichterstattung der Unternehmen wieder [28].

⁷ Lindeijer, E., 1998. Kapitaalgoederen in LCA data van bedrijven. IVAM-ER, Amsterdam

Im Rahmen einer ökologischen Betrachtung nach den Vorgaben des GHG-Protocol gilt es neben den Emissionen nach Scope 1 und 2 auch den kompletten Lebenszyklus der Produkte/Dienstleistungen des Unternehmens zu erfassen. Dieser umfasst u. a. auch die Upstream- (z. B. Bereitstellung und Transport von Rohstoffen oder Vorstufen) und Downstream-Aktivitäten (z. B. Transport von Produkten, Abfallbehandlung, Nutzungsphase) sowie Dienstreisen der Mitarbeiter. In diesem Zusammenhang gibt der Standard vor, dass Anlagegüter zu erfassen sind. Diese sollen im Jahr der Anschaffung vollständig ökologisch beschrieben werden.

ILCD-Handbuch

Das ILCD-Handbuch stellt eine Reihe von technischen Dokumenten zur *Guten Praxis* für Ökobilanzen in Behörden und Unternehmen bereit. Diese Leitlinie zielt, aufgrund der Vielzahl an Möglichkeiten, auf die Sicherstellung von Konsistenz und Qualität bei der Erstellung sowie Berichterstattung für eine LCA-Bewertung nach den internationalen Standards DIN EN ISO 14040 und 14044. Die Entwicklung des Handbuchs erfolgte auf Initiative der Europäischen Kommission. [29]

Bezüglich eines einzelnen Produktionsprozesses werden konkrete Angaben zu den zu erfassenden Inputs und Outputs gegeben, die u. a. auch die Anlagegüter umfassen. Im Hinblick auf die Anlagen bzw. Maschinen und Equipment sind die Aktivitäten *Vorbereitung*, wie z. B. Inertisieren, *Durchführen Prozess*, *Stand-by Zeiten* und *Nachbereitung*, wie z. B. Reinigung, aufgeführt. Um die Produktionsanlage selbst in den Betrachtungen mit zu berücksichtigen, werden bei fehlenden Daten zur Herstellung eine Abschätzung der verbauten Materialien und deren Masse sowie deren jeweilige Ausführung (z. B. Rohre, Folie, Profil oder Fertigteil) empfohlen. Die ermittelten ökologischen Aufwendungen sind auf die erwartete Produktionsdauer in der Anlage verteilt. [30] In Verbindung mit einem einzelnen Apparat gelten verursachte Aufwendungen, wie Wartung und Reparatur, als zusätzlich zu erfassende Prozesse, die dem einzelnen Equipment zuzuordnen sind.

Die Berücksichtigung von Anlagegütern wird als ein Beispiel genannt, welches aufgrund fehlender Vorgaben sowohl in Bezug auf die Abbildung und das Einbeziehen in ökologische Betrachtungen bzw. Analysen durch die verschiedenen Anwender auf unterschiedlichste Weise erfolgt. Häufig werden diese weggelassen, obwohl Betrachtungen gezeigt haben, dass Produktion und Wartung der Anlagegüter stellenweise den Großteil der ökologischen Aufwendungen im Lebenszyklus verursachen können (genanntes Beispiel: Windkraftanlagen).

PEF-Leitfaden

Von der durch den europäischen Rat beauftragten europäischen Kommission wurde am 09. April 2013 eine Empfehlung „für die Anwendung gemeinsamer Methoden zur Messung und Offenlegung der Umweltleistung von Produkten und Organisationen“ veröffentlicht. Der Leitfaden zielt darauf ab, wie bereits geschrieben, einen einheitlichen Standard einzuführen. Die Inhalte des Leitfadens stützen sich auf die im Vorfeld aufgeführten Ansätze, mit Ausnahme des GHG-Protocol.

Der Leitfaden liefert eine Methode zur Ermittlung der Umweltauswirkungen über den Lebensweg eines Produktes. Dies umfasst die Modellierung unter Berücksichtigung von Stoff- und Energieflüssen, Emissionen und Abfallströmen. Die Vorgaben in der Leitlinie sehen bei der Erstellung von *Product Environmental Footprints* (PEF) vor, dass die Aufwendungen, die durch Investitionsgüter verursacht werden, bei den Betrachtungen mit zu berücksichtigen sind. Zu den Investitionsgütern gehören demnach die in Produktionsprozessen eingesetzten Maschinen, die Gebäude, die Büroausstattung, eingesetzte Transportfahrzeuge und die Verkehrsinfrastruktur. Diese sind linear abzuschreiben, wobei die erwartete Lebensdauer der Investitionsgüter zu berücksichtigen ist und nicht der ökonomische Buchwert von 0. Das Abschneiden von Inputs oder Outputs wird explizit ausgeschlossen. [5]