

Ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung und -optimierung unter Nutzung kartografischer Generalisierung

Holistic Sustainability Assessment and Optimization Using Cartographic Generalization

Rita Al-Ayoubi^{1,*}, Sven Wehrend², Katharina Zumach², Prof. Dr. André Köhler¹, Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause²

¹ Department of Mechanical Engineering and Business Administration, Lübeck University of Applied Sciences

² Institute of Product Development and Mechanical Engineering Design, Hamburg University of Technology

* Korrespondierender Autor:

Technische Hochschule Lübeck

Mönkhofer Weg 239

23562 Lübeck

✉ rita.al-ayoubi@th-luebeck.de

Abstract

This paper presents an extension of the Process Atlas System (PAS) to enable holistic sustainability assessment in industrial processes. By integrating Life Cycle Assessment (LCA), Life Cycle Costing (LCC), and Social Life Cycle Assessment (SLCA), the new S-PAS method visualizes ecological, economic, and social impacts at process level. A case study on disposable paper cup production demonstrates how S-PAS supports early-stage decision-making in product development through clear, process-specific sustainability visualization.

Keywords

Sustainability Assessment, Process-Atlas-System, Life Cycle Assessment, Industrial Processes, Product Development

1. Motivation

Die Umsetzung globaler Nachhaltigkeitsziele sowie gesetzliche Vorgaben wie das Lieferkettengesetz und die Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) verpflichten Unternehmen zunehmend dazu, ökologische, soziale und ökonomische Aspekte systematisch in ihre Prozesse zu integrieren [1], [2]. Mit diesen verschärften regulatorischen Anforderungen wächst der Druck auf Unternehmen, Nachhaltigkeit nicht nur im Rückblick zu bewerten, sondern bereits in frühen Phasen der Produktentwicklung zu berücksichtigen. Dies betrifft insbesondere die Herstellungsprozesse sowie den späteren Einsatz eines Produkts im Wertschöpfungskontext [3].

Ein Ansatz zur strukturierten Analyse und Verbesserung solcher Prozesse ist die kartografiebasierte Prozess-Atlas-Systematik (PAS). Sie unterstützt durch visuell vereinfachte Darstellungen die Analyse komplexer Abläufe und hilft dabei, Optimierungspotenziale sichtbar zu machen [4]. Im Kontext dieses Beitrags bezeichnet „komplex“ Prozesse mit mehreren organisatorischen Einheiten bzw. Abteilungen, deren Abläufe und Wechselwirkungen in klassischen Prozessdarstellungen häufig nicht vollständig oder nur schwer nachvollziehbar sind. Die PAS konzentriert sich bislang jedoch vorwiegend auf die Bewertung betrieblicher Verschwendungen, ohne ökologische, ökonomische oder soziale Nachhaltigkeitsaspekte explizit zu berücksichtigen. Ihre kartografische Logik macht sie dennoch zu einer geeigneten Grundlage für die prozessbezogene Integration von Nachhaltigkeitsinformationen.

Ziel dieses Beitrags ist die Entwicklung eines Konzepts, das es ermöglicht, etablierte Nachhaltigkeitsbewertungen direkt in die Prozessmodellierung einzubetten. Dadurch entsteht eine fundierte Entscheidungsgrundlage, um nachhaltigkeitsrelevante Schwachstellen systematisch zu identifizieren, transparent zu kommunizieren und gezielte Maßnahmen zur Verbesserung abzuleiten.

2. Stand der Technik

Zur systematischen Erweiterung der PAS um Nachhaltigkeitsaspekte ist es erforderlich, die Methode der PAS sowie etablierte Ansätze der Nachhaltigkeitsbewertung gezielt zu untersuchen. Dieses Kapitel fasst relevante Ansätze zusammen, die aktuell in Wissenschaft und Praxis verbreitet sind. Dabei werden insbesondere Methoden betrachtet, die ökologische, ökonomische oder soziale Aspekte industrieller Prozesse bewerten. Ziel ist es, eine Grundlage zu schaffen, auf deren Basis im weiteren Verlauf analysiert werden kann, welche dieser Verfahren sich für eine Integration in die PAS eignen.

2.1. Prozess-Atlas-Systematik

Die PAS ist eine Methode zur Analyse und Gestaltung industrieller Prozesse, die auf Prinzipien der Kartografie basiert [4]. Sie verfolgt das Ziel, durch kartografische Generalisierung komplexe Prozessmodelle übersichtlich und fokussiert darzustellen. Die PAS strukturiert Prozesse auf unterschiedlichen Detailebenen, nutzt ein definiertes Symbolsystem und beschränkt Darstellungen auf eine DIN-A4-Seite. Ihre Stärke liegt in der systematischen Verfeinerung (Zoomlogik), der klaren Visualisierung von Schwachstellen und der strukturierten Ableitung von Handlungsempfehlungen [4].

Als Grundlage der vorliegenden Arbeit dient die PAS als prozessorientiertes Visualisierungs- und Analyseinstrument, das in diesem Beitrag um Nachhaltigkeitsaspekte erweitert wird.

2.2. Ökologische Bewertung

Die ökologische Nachhaltigkeit wird in der Literatur vorrangig über das Life Cycle Assessment (LCA) erfasst. Das LCA ist eine standardisierte Methode zur Quantifizierung von

Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts hinweg. Sie ist in vier Hauptphasen unterteilt [5]:

Ziel- und Untersuchungsrahmen: Festlegung der Systemgrenzen und Zielsetzung. Diese beeinflussen maßgeblich den Ablauf und die Ergebnisse der Analyse.

Sachbilanz: Sammlung quantitativer Daten zu Materialflüssen, Emissionen und Abfällen.

Wirkungsabschätzung: Bewertung potenzieller Umweltauswirkungen durch Zuordnung von Sachbilanzdaten zu Wirkungskategorien (z. B. Klimawandel).

ReCiPe: Nutzt Midpoint- und Endpoint-Indikatoren zur differenzierten Bewertung; Endpunkte beziehen sich auf Gesundheit, Ökosystemqualität und Ressourcenverfügbarkeit.

Global Warming Potential (GWP): Bewertet die Klimawirkung von Treibhausgasen relativ zu CO₂ über Zeiträume wie 20, 100 oder 500 Jahre.

Auswertung: Interpretation der Ergebnisse mittels Konsistenz-, Vollständigkeits- und Sensitivitätsprüfungen sowie Ableitung von Schlussfolgerungen und Empfehlungen.

2.3. Ökonomische Bewertung

Zur ökonomischen Bewertung wird das Life Cycle Costing (LCC) eingesetzt, das eine systematische Erfassung sämtlicher über den Produktlebenszyklus hinweg anfallender Kosten ermöglicht [5]. Die Methode berücksichtigt unter anderem Anschaffungs-, Betriebs-, Wartungs- sowie Entsorgungs- oder Recyclingkosten und berechnet die Gesamtkosten durch Aufsummieren aller relevanten Positionen über einen definierten Analysezeitraum hinweg. LCC dient damit als Entscheidungsgrundlage zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Produkten und Prozessen im Lebenszykluskontext [5].

2.4. Materialfluss- und Energieanalyse

Die Material Flow Cost Accounting (MFCA) ist eine wirtschaftlich-ökologische Methode, die aufzeigt, wo Materialverluste und Ineffizienzen in Prozessen auftreten [6]. Diese Methode ist ebenfalls genormt (ISO 14051) und wird vielfach durch Sankey-Diagramme visualisiert. Der kombinierte Einsatz von LCA und MFCA ermöglicht es, sowohl ökologische als auch monetäre Auswirkungen in einer Analyse zu berücksichtigen [6].

Weitere Verfahren wie die "Simplified Version of Plant Metabolism" integrieren LCA, EMFA und Multi-Criteria Decision Making (MCDM), um eine systematische Modellierung und Optimierung auf Basis von Key Performance Indicators (KPIs) zu ermöglichen [7].

2.5. Soziale Bewertung

Die Social Life Cycle Assessment (SLCA) dient der Bewertung sozialer Auswirkungen über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg [8]. Sie orientiert sich methodisch an der LCA, ist jedoch nicht vollständig standardisiert. Zwei zentrale Bewertungsansätze sind der Referenzskalenansatz (Reference Scale S-LCIA) und der Wirkpfadansatz (Impact Pathway S-LCIA). Beide zielen darauf ab, soziale Risiken und Potenziale für unterschiedliche Stakeholder-Gruppen (z. B. Arbeitnehmende, Gemeinden, Verbraucher) zu identifizieren [8].

2.6. Kombinierte Methodenansätze

Moderne Verfahren integrieren mehrere Nachhaltigkeitsdimensionen. Das Multi-Layer Stream Mapping (MSM) erweitert klassische Wertstromanalysen um Umwelt- und Sozialindikatoren [9]. Die Methode Extended Value Stream Mapping (eVSM) kombiniert LCA, LCC und SLCA zur Bewertung der Energieeffizienz entlang der Prozesskette [10]. Weitere Methoden wie das Manufacturing Sustainability Assessment (MSA) verbinden visuelle

Werkzeuge mit Priorisierungsverfahren wie dem Analytical Hierarchy Process (AHP) [11]. Auch die Indizes ProdSI und ProcSI erlauben durch gewichtete Metriken eine Bewertung von Produkten und Prozessen hinsichtlich ökologischer, ökonomischer und sozialer Kriterien [12].

3. Weiterentwicklungsbedarf

In der wissenschaftlichen Literatur existiert eine Vielzahl etablierter Methoden zur Bewertung ökologischer, ökonomischer und sozialer Nachhaltigkeitsaspekte. Verfahren wie das LCA, LCC oder die SLCA ermöglichen differenzierte Analysen entlang des gesamten Produktlebenszyklus [5], [8]. In der Praxis erfolgt deren Anwendung jedoch häufig getrennt von der operativen Prozessmodellierung und -analyse [8], [13].

An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an: Ziel ist es, die bestehende PAS, die bislang auf die Identifikation betrieblicher Verschwendungen fokussiert ist [4], methodisch weiterzuentwickeln. Durch die gezielte Einbindung von Nachhaltigkeitsbewertungsmethoden soll die PAS zu einem ganzheitlichen Instrument ausgebaut werden, das die bestehende Prozessanalyse um eine Nachhaltigkeitsbewertung ergänzt. Der entstehende Ansatz erlaubt die kontextualisierte Darstellung von Nachhaltigkeitsinformationen direkt in der Prozessmodellierung und schafft so eine Grundlage für strategische Entscheidungen in der Produktentwicklung und Prozessoptimierung. Dadurch soll die Nachhaltigkeitsbewertung industrieller Prozessschritte transparenter und vergleichbarer werden.

4. Vorgehensweise

Die methodische Grundlage bildet eine umfassende Analyse bestehender Nachhaltigkeitsbewertungsmethoden, die im Rahmen einer systematischen Literaturrecherche identifiziert und bewertet wurden. Eine ausführliche Darstellung dieser Recherche erfolgt im Rahmen dieses Beitrags nicht, da der Schwerpunkt auf der Integration der ausgewählten Methoden in die PAS liegt. Ziel ist es, ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeitsaspekte durch die Einbindung von LCA, LCC und SLCA in die PAS zu überführen.

Die methodische Verknüpfung erfolgt innerhalb eines iterativen Vorgehensmodells, das zentrale Elemente der PAS – wie Zieldefinition, Schwachstellenanalyse und Handlungsempfehlungen – mit den Bewertungslogiken von LCA, LCC und SLCA kombiniert. Ergänzend wurde ein Visualisierungskonzept entwickelt, das die Nachhaltigkeitswirkungen einzelner Prozessschritte direkt innerhalb der PAS-Darstellung abbildet. Durch diese Verbindung entsteht die Sustainability-Prozess-Atlas-Systematik (S-PAS), ein integrierter Ansatz zur prozessorientierten Nachhaltigkeitsbewertung. Die Anwendbarkeit und Aussagekraft der Methode wird exemplarisch anhand einer Fallstudie zur Herstellung von Einweg-Pappbechern demonstriert.

4.1. Auswahl geeigneter Methoden

Zur Auswahl geeigneter Methoden für die Integration in die PAS wurden Bewertungskriterien entwickelt. Diese leiten sich direkt aus den Merkmalen und Zielen der PAS ab, um deren bestehende Stärken zu bewahren. Zu den zentralen Anforderungen zählen:

- Adaptierbarkeit an unterschiedliche Prozesse,
- Verständlichkeit der Ergebnisse,
- Benutzerunterstützung zur Förderung der Anwendbarkeit,
- Problemfokussierung zur gezielten Analyse relevanter Prozessabschnitte sowie
- Standardisierung zur Sicherstellung von Konsistenz und breiter Anwendbarkeit.

Insgesamt wurden 18 Nachhaltigkeitsbewertungsmethoden untersucht. Die Kriterien zur Auswahl wurden systematisch strukturiert, durch Zielfragen konkretisiert und mit PAS-spezifischem Kontext begründet. Ihre Relevanz wurde durch einen PAS-Experten validiert.

Zur objektiven Bewertung kam eine fünfstufige Likert-Skala zum Einsatz, um die Erfüllung jedes Kriteriums systematisch und vergleichbar zu erfassen. Anschließend wurde eine Nutzwertanalyse durchgeführt. Alle potenziellen Methoden wurden anhand der Kriterien bewertet und die Ergebnisse tabellarisch gegenübergestellt.

Die drei Methoden mit den höchsten Gesamtwerten – LCA, LCC und SLCA – wurden für die Integration in die PAS ausgewählt, da sie die Anforderungen am besten erfüllen. Kombinierte Verfahren wie LCSA wurden ebenfalls geprüft, aber nicht weiterverfolgt, da sie keine eigenständige methodische Tiefe über die Einzelelemente hinaus bieten.

4.2. Synthese ausgewählter Methoden

Sowohl das LCA als auch die PAS beginnen mit der klaren Festlegung der Ziele und des Untersuchungsrahmens [4],[5]. Dieser Schritt ist in beiden Ansätzen von zentraler Bedeutung, da er sicherstellt, dass der Fokus und der Umfang der Analyse präzise definiert sind, um ein strukturiertes und zielgerichtetes Vorgehen zu ermöglichen. Beide Methoden weisen zudem einen iterativen Charakter auf [4],[5]. In der PAS erfolgt dieser explizit durch eine wiederholte Schleife zwischen der Erfassung des Ist-Zustands und der Schwachstellenanalyse [4]. Ähnlich verhält es sich beim LCA, wo es kontinuierliche Rückkopplungen zwischen den Phasen der Sachbilanz, Wirkungsabschätzung, Rahmenfestlegung und der Auswertung gibt, die zur schrittweisen Verfeinerung der Analyse beitragen [5].

Beide Ansätze beinhalten eine tiefgehende Prozessanalyse [4],[5]. Im LCA wird diese durch die Phasen der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung realisiert, während in der PAS die Schwachstellenanalyse auf Basis von identifizierten Verschwendungen eine ähnliche Funktion erfüllt. Jedoch unterscheiden sich die Zielsetzungen der beiden Methoden. Das LCA zielt auf eine umfassende Bewertung von Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus ab, während die PAS sich mehr auf die betriebliche Effizienz und das Aufdecken von Verschwendungen konzentriert, um eine Prozessoptimierung zu erzielen [4],[5].

5. Vorstellung der S-PAS

Bisher adressiert die PAS primär Effizienzverluste durch Verschwendung [4]. Durch die Erweiterung der PAS um Aspekte der Nachhaltigkeit wird eine kontextualisierte und verständliche Visualisierung der Nachhaltigkeitsbewertung angestrebt, um die frühzeitige Einbindung von Nachhaltigkeitsaspekten in sämtliche mit der Produktentwicklung verbundenen Prozesse zu erleichtern. Bild 1 veranschaulicht die entwickelte Zusammenführung der Ansätze und stellt die Erweiterung der PAS, die S-PAS, dar. Sie folgt einem iterativen Ansatz, der eine fortlaufende Anpassung und Optimierung ermöglicht.

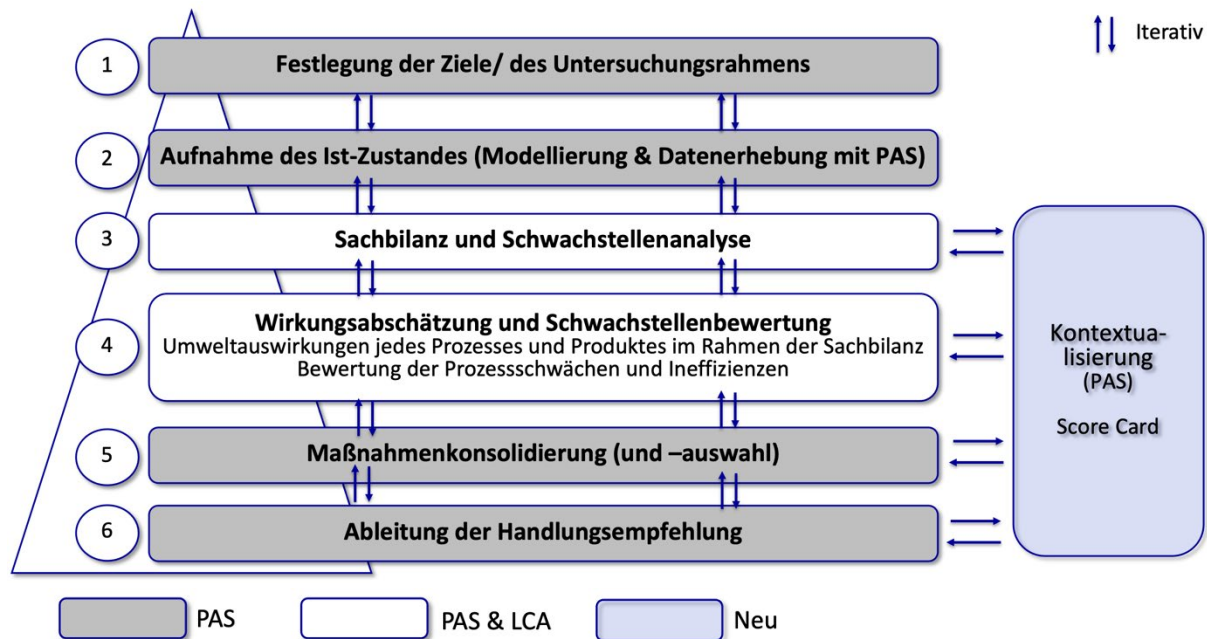


Bild 1: Vorgehensweise der Sustainability-Prozess-Atlas-Systematik (S-PAS)

Der Rahmen ist in sechs iterative Phasen gegliedert, die aufeinander aufbauen und durch Kontextualisierung und Visualisierung ergänzt werden:

1. Festlegung der Ziele/ des Untersuchungsrahmens: Es werden Zielsetzung, Systemgrenzen und der zu analysierende Prozess definiert. Diese Phase legt die Basis für die gesamte Bewertung.
2. Aufnahme des Ist-Zustands: Der reale Prozess wird mithilfe der PAS modelliert und relevante Daten erhoben. Dies dient als Ausgangspunkt für die nachfolgenden Analysen.
3. Sachbilanz und Schwachstellenanalyse: Hier erfolgt die Erfassung von Input- und Outputgrößen sowie die Identifikation von Prozessineffizienzen (z. B. Verschwendung).
4. Wirkungsabschätzung und Schwachstellenbewertung: Mithilfe der Methoden LCA (Life Cycle Assessment), LCC (Life Cycle Costing) und SLCA (Social Life Cycle Assessment) werden Umwelt-, Kosten- und Sozialauswirkungen der Prozessschritte bewertet. Gleichzeitig werden Schwächen hinsichtlich ihrer Auswirkungen eingeordnet.
5. Maßnahmenkonsolidierung und -auswahl: Potenzielle Verbesserungsmaßnahmen werden systematisch entwickelt, priorisiert und zur Auswahl gestellt.
6. Ableitung der Handlungsempfehlung: Aufbauend auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Phasen werden konkrete Maßnahmen zur Umsetzung formuliert.

Die Kontextualisierung und die ergänzende Verwendung von Score Cards sorgen dafür, dass alle Bewertungsergebnisse transparent und prozessspezifisch visualisiert werden. Zudem ist das Modell iterativ angelegt – einzelne Schritte können bei Bedarf mehrfach durchlaufen werden, um die Ergebnisse zu verfeinern.

Während bestimmte Schritte direkt aus der PAS übernommen wurden, stammen andere, wie Sachbilanz und Wirkungsabschätzung, aus dem LCA. Neu hinzugefügte Schritte, insbesondere die Kontextualisierung und Visualisierung der Ergebnisse auf Prozessebene, erweitern die PAS um Nachhaltigkeitsaspekte und ermöglichen eine zielgerichtete Bewertung entlang einzelner Prozessschritte.

6. Visualisierungskonzept

Das Visualisierungskonzept der S-PAS wurde basierend auf dem Modell von Gebhardt [14] entwickelt, um die Nachhaltigkeitsbewertungen aus den Methoden LCA, LCC und SLCA verständlich und prozessorientiert in die PAS zu integrieren. Mithilfe eines morphologischen Kastens wurden geeignete Darstellungsformen wie ein Ampelsystem und Score Cards ausgewählt, um Nachhaltigkeitsindikatoren kontextbezogen und benutzerfreundlich visualisieren zu können.

Für die ökologische Bewertung (LCA) wird ein Bubble-System verwendet, das Emissionen proportional zur höchsten Prozessbelastung darstellt. Die wirtschaftliche Bewertung (LCC) erfolgt durch ein gestuftes Euro-Symbol-System (€ bis €€€), ergänzt durch eine optionale Farbcodierung. Zur Darstellung sozialer Aspekte (SLCA) kommen farbige Strichmännchen zum Einsatz, die Risiken nach einer Likert-Skala bewerten und kritische Subkategorien besonders hervorheben. Die Visualisierungen ermöglichen eine schnelle, vergleichende Einschätzung der Nachhaltigkeit auf Prozessebene und erweitern das Symbolsystem der PAS. Prozesse können dabei nur innerhalb derselben Modellierungsebene miteinander verglichen werden.

7. Fallstudie

Die Fallstudie analysiert die Herstellung von Einweg-Pappbechern mithilfe der entwickelten S-PAS-Methode. Ziel ist es, exemplarisch zu zeigen, wie Nachhaltigkeitsaspekte prozessschrittweise bewertet und visualisiert werden können.

In dieser Fallstudie wird die Anwendung der S-PAS anhand eines fiktiven Beispiels veranschaulicht. Als Referenzunternehmen dient die hypothetische MasterCup GmbH mit Sitz in Hamburg, die seit 2021 als Hersteller von Einwegpappbechern auftritt. Das Unternehmen produziert Becher für den Einsatz in Gastronomiebetrieben und bei Veranstaltungen. Vor dem Hintergrund steigender Anforderungen an nachhaltige Produktionsweisen verfolgt MasterCup das Ziel, seine Prozesse im Hinblick auf ökologische, ökonomische und soziale Kriterien systematisch zu analysieren. Im Zentrum stehen dabei reale Herausforderungen wie Emissionen, Ressourcenverbrauch und soziale Auswirkungen.

Zur praktischen Umsetzung der Methode werden die Produktionsschritte von der Anlieferung der Papierrollen bis zum Versand der fertigen Produkte betrachtet. Der Untersuchungsrahmen fokussiert auf die Kernprozesse der Herstellung; vor- und nachgelagerte Aktivitäten bleiben ausgeklammert. Die funktionelle Einheit der Bewertung umfasst 5000 Becher.

Die für die Fallstudie verwendeten Daten beruhen auf einer Kombination aus Sekundärdaten aus der Literatur, Normwerten (z. B. CO₂-Emissionen pro kg Papier), sowie plausibilisierten Annahmen auf Basis von Erfahrungswerten aus ähnlichen Produktionsumgebungen. Da es sich um ein hypothetisches Beispiel handelt, liegt der Fokus auf der Demonstration der methodischen Vorgehensweise. Eine Validierung der Datenqualität erfolgte durch Plausibilitätsprüfungen und Abgleich mit öffentlich zugänglichen Quellen. Gleichwohl sind die Ergebnisse als exemplarisch zu verstehen und können je nach realer Datengrundlage variieren.

Im Zuge der Anwendung werden mit der S-PAS-Methode die CO₂-Äquivalente sowie die entstehenden Kosten in den jeweiligen Prozessschritten erhoben. Ergänzend erfolgt eine soziale Bewertung mittels Social Life Cycle Assessment (SLCA), wobei exemplarisch die Stakeholder-Kategorie „Arbeiter“ einbezogen wird. Ziel der Analyse ist es, Nachhaltigkeitswirkungen sichtbar zu machen und zugleich mögliche Verbesserungspotenziale aufzuzeigen, die eine nachhaltigkeitsorientierte Optimierung des Produktionsprozesses ermöglichen.

7.1. Prozessanalyse

Die Produktionskette des Pappbechers wird zunächst mit der PAS schematisch dargestellt (siehe Bild 2). Dabei werden typische Prozessschritte wie Materialbereitstellung, Bedruckung, Formung, Klebung und Verpackung modelliert.

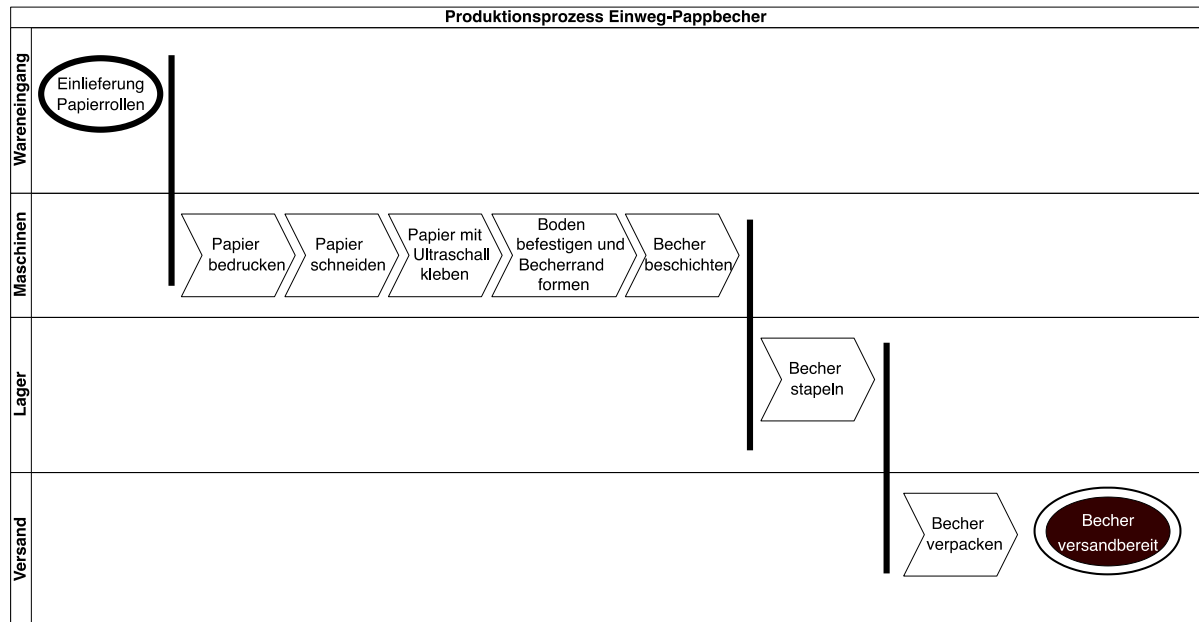


Bild 2: Der Produktionsprozess des Pappbechers

Für jeden dieser Schritte werden Input- und Output-Daten erfasst, z. B. Materialmengen, Energieverbrauch, Emissionen sowie Ausschussraten (siehe Bild 3).

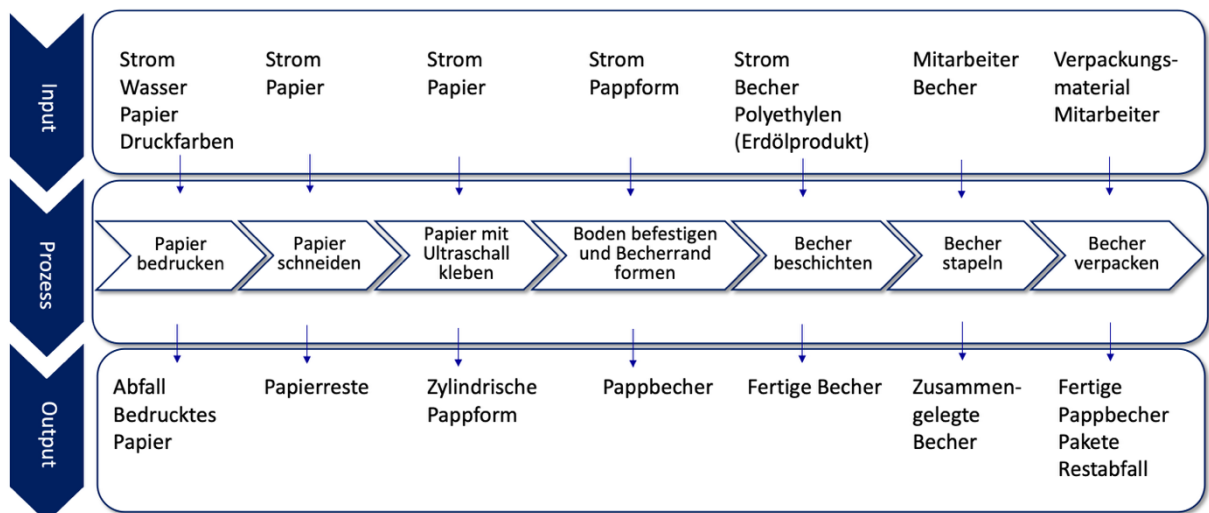


Bild 3: Datenerhebung

Mithilfe der Methoden LCA, LCC, und SLCA werden die Prozessschritte analysiert. Besonders hohe Umweltwirkungen werden dabei z. B. in der Klebung und Bedruckung identifiziert. Die soziale Komponente wird exemplarisch an Stakeholdern wie „Arbeitnehmende“ untersucht.

7.2. Visualisierung mit S-PAS

Die Ergebnisse werden prozessspezifisch auf einer S-PAS-Karte visualisiert, wobei farbliche Markierungen auf kritische Prozessschritte hinweisen (siehe Bild 4). Zusätzlich werden Indikatoren wie CO₂-Äquivalente, Kosten und soziale Risiken an die Prozessschritte angebunden.

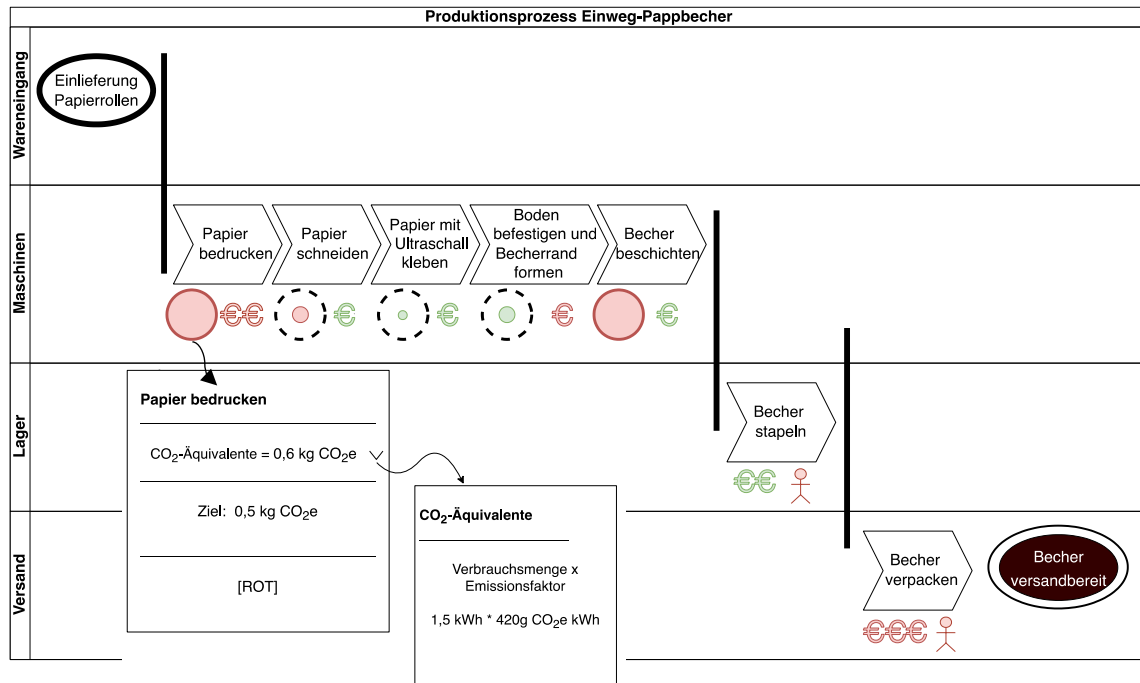


Bild 4: Gesamtergebnis der S-PAS

Die zusammenfassende Darstellung der S-PAS bildet eine Basis für Entscheidungsprozesse, indem sie potenziellen Handlungsbedarf sichtbar macht. Ergänzend dazu bietet die gezeigte Score-Card-Ansicht eine Möglichkeit, spezifische Informationen zu den einzelnen Nachhaltigkeitsdimensionen bereitzustellen. Exemplarisch wird dies am Prozessschritt „Papier bedrucken“ veranschaulicht: Eine rot markierte Bubble signalisiert hier Optimierungsbedarf. Klickt der Anwender auf diese interaktive Bubble, öffnet sich die entsprechende Score Card, in der unter anderem relevante ökologische Kennzahlen wie die CO₂-Äquivalente und ein zugehöriger Zielwert aufgeführt sind. Für einen tiefergehenden Einblick lässt sich über das Symbol „V“ eine erweiterte Darstellung aufrufen, welche beispielsweise die Berechnungsgrundlage der CO₂-Äquivalente offenlegt.

Aus den Ergebnissen werden mögliche Verbesserungsansätze abgeleitet, wie etwa der Einsatz emissionsärmerer Klebstoffe, effizienterer Maschinen oder sozialverträglicherer Arbeitsbedingungen.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Die entwickelte S-PAS stellt einen integrativen Ansatz dar, um Nachhaltigkeit systematisch zu analysieren, prozessorientiert darzustellen und so industrielle Entscheidungsprozesse zu unterstützen. Durch die direkte Verknüpfung von Nachhaltigkeitsindikatoren mit einzelnen Prozessschritten wird eine kontextbezogene Bewertung ermöglicht, die sowohl analytisch fundiert als auch visuell nachvollziehbar ist. Besonders im Rahmen der Produktentwicklung eröffnet die Methode neue Potenziale. Sie erlaubt es, bereits in frühen Entwicklungsphasen fundierte Aussagen über die langfristigen Nachhaltigkeitswirkungen verschiedener Produktkonzepte zu treffen.

Ein wesentliches Ergebnis dieser Arbeit ist, dass mithilfe der S-PAS die Auswirkungen von Entscheidungen in der Produktgestaltung, wie beispielsweise die Auswahl von Materialien oder Fertigungsmethoden, über den gesamten Lebenszyklus hinweg analysiert und mit bestehenden Lösungen verglichen werden können. Damit unterstützt die Methode eine frühzeitige Integration von Nachhaltigkeit in die Produktentwicklung, in einer Phase, in der die Einflussmöglichkeiten auf die spätere Nachhaltigkeitsleistung besonders hoch sind.

Gleichzeitig zeigen sich Herausforderungen, insbesondere in Bezug auf die Verfügbarkeit und Qualität der für die Bewertung benötigten Daten. Auch die technische Einbindung der Methode in bestehende digitale Entwicklungsumgebungen, wie Produktdatenmanagement- oder CAD-Systeme, stellt eine wichtige Weiterentwicklungsaufgabe dar.

Langfristig besitzt die S-PAS das Potenzial, als standardisiertes Werkzeug in der industriellen Praxis etabliert zu werden. Sie schafft eine Verbindung zwischen nachhaltigkeitsorientierter Prozessanalyse und strukturierter Produktentwicklung und bietet damit eine fundierte Grundlage für zukunftsgerichtete unternehmerische Entscheidungen

Danksagung

Die vorgestellten Forschungsergebnisse sind Teil des Forschungsprojektes: RECab - Resource Efficient Cabin. Das Projekt ist gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) im Rahmen des sechsten zivilen Luftfahrtforschungsprogramms (LUFO VI-2). Förderkennzeichen: 20K2103E

Literaturverzeichnis

- [1] Verheyen, Roda: Das Lieferketten-Sorgfaltspflichtengesetz: Auslegung der Umweltsorgfaltspflichten und Ansätze zur praktischen Umsetzung. Hamburg, 2024.
- [2] Umweltbundesamt: Empfehlungen für die Entwicklung von Nachhaltigkeitsberichtsstandards im Rahmen der Corporate Sustainability Directive (CSRD). Dessau-Roßlau, 2021.
- [3] Europäische Kommission: Proposal for a Regulation on Ecodesign for Sustainable Products. Brüssel, 2022.
- [4] Köhler, André; Sandler, Markus: Prozessoptimierung mithilfe der Prozess-Atlas-Systematik. In: ZWF 117, 2022.
- [5] Deutsches Institut für Normung (DIN): Lebenszykluskosten (LCC) und Lebenszyklusanalyse (LCA) der CO₂-Emissionen von Rohrsystemen aus duktilem Gusseisen. Deutsche Fassung EN 17800:2022. Berlin: Beuth Verlag, 2023.
- [6] Dekamin, M.; Sadeghimofrad, T.; Ahmadloo, A.: Energy, economic, and environmental (3E) assessment of the major greenhouse crops: MFCA-LCA approach. Berlin: Springer-Verlag, 2024.
- [7] Favi, C. et al.: Sustainable and energy management of discrete manufacturing plants in the Industry 4.0 framework. In: Applied Energy 306 (2022), Art. 117984.
- [8] Life Cycle Initiative (LCI): Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organizations. 2020.
- [9] Gomes, M. N. et al.: Multi-Layer Stream Mapping: Application to an Injection Moulding Production System. Cham: Springer International Publishing AG, 2017.
- [10] Kluczek, A.; Gładysz, B.: Energy LCA-Oriented Sustainability Analysis Assessment Approach for Visualization of Energy-Efficient Manufacturing. In: Innovations Induced by Research in Technical Systems. Cham: Springer International Publishing AG, 2020, S. 61–72.
- [11] Mubin, A.; Utama, D.; Nusantara, R.: Manufacturing Sustainability Assessment Comprising Physical and Mental Workload: An Integrated Modified SVSM and AHP Approach. In: Process Integration and Optimization for Sustainability. Cham: Springer Nature, 2022, S. 407–417.
- [12] Badurdeen, F. et al.: Sustainable Value Creation in Manufacturing at Product and Process Levels: Metrics-Based Evaluation. In: Handbook of Manufacturing Engineering and Technology. London: Springer-Verlag, 2015.
- [13] Backes, J. et al.: Visualization and Interpretation of Life Cycle Sustainability Assessment—Existing Tools and Future Development. In: Sustainability 15 (2023), Nr. 4, Art. 3204.
- [14] Gebhardt, J. N.: Methodische Entwicklung von Visualisierungen als Arbeitswerkzeuge in der Produktentwicklung. Dissertation, Technische Universität Hamburg. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.