

Nachhaltigkeitsdiamant – Bewertungs- und Implementierungsmethode für eine nachhaltigkeitsorientierte Produktentwicklung

Daniel Kammerl¹

Roland Zink²

ABSTRACT

Im vorliegenden Beitrag wird der Nachhaltigkeitsdiamant beschrieben, eine Methode, um die Nachhaltigkeit eines Produkt- oder Produkt-Service-Systems basierend auf den drei Säulen der Nachhaltigkeit zu bewerten. Der Fokus liegt dabei insbesondere auf der frühen Phase der Entwicklung, um im Gegensatz zu einer Vielzahl der bestehenden Bewertungsmethoden proaktiv und nicht reaktiv handeln zu können. Mithilfe der Methode wird der komplexe Sachverhalt der Nachhaltigkeit messbar und graphisch auf einfach verständliche Art und Weise dargestellt.

The paper presents the sustainability diamond, an assessment methodology which is designed to measure sustainability of products and product-service systems based on the three pillars of sustainability. The focus is on the early phase of the development to enable a proactive instead of a reactive approach. This contrasts with most of the existing assessment methodologies. By means of the methodology, the complex issue of sustainability is made assessable and presented graphically in an easy and understandable manner.

KEYWORDS

Nachhaltigkeit, Bewertung, Produkt-Service-System, Entwicklung

Sustainability, assessment, product-service system, development

1. Einleitung

Nachhaltigkeit nimmt in der Bevölkerung, der Industrie und auch in der Wissenschaft eine zunehmend bedeutendere Rolle ein. So setzen sich viele wissenschaftliche Studien damit auseinander, wie Produkte und Produkt-Service-Systeme (PSS) ressourcenschonend, sozial verträglich und ökonomisch sinnvoll gestaltet werden können. Aufwendige Analyseverfahren wie etwa Life Cycle Assessment zerlegen die Endprodukte oder Dienstleistungen wieder in ihre Einzelkomponenten mit den jeweiligen Herstellungsprozessen und Lieferketten und summieren verschiedene Kennzahlen bilanziell auf. Die Kennzahlen betreffen den Materialeinsatz, den Ressourcen- und Energiebedarf oder die Gesamtemissionen

wie CO₂ oder Stickoxide. Die Vorgehensweise beginnt folglich zumeist beim fertigen Produkt oder der Dienstleistung und arbeitet sich davon ausgehend chronologisch rückwärtsgehend durch den Herstellungsprozess.

In Abgrenzung zu diesem Verfahren betrachtet der vorliegende Beitrag nicht nur das fertige Endprodukt, sondern zeigt eine Strategie auf, um nachhaltige Bewertungsmaßstäbe bereits in der Produktentwicklung einzusetzen. Zudem fokussieren viele der existierenden Ansätze auf eine der Säulen, etwa die Kosten, der Nachhaltigkeitsdiamant betrachtet jedoch alle drei Säulen der Nachhaltigkeit gleichzeitig. Der Herstellungs- und Bereitstellungsprozess wird dabei analog zu den oben genannten Bewertungsverfahren modellhaft erfasst,

¹ Deutsche Bahn AG, Bereich Beschaffung Schienenfahrzeuge und Schienenfahrzeugteile

² Technologie Campus Freyung, Technische Hochschule Deggendorf

dies ist aber schon im Voraus möglich, so dass sich Empfehlungen aus der Nachhaltigkeitsbewertung bereits vor der Produkterstellung in den Prozess integrieren lassen. Mit derartigen Ansätzen lassen sich Innovationen einer nachhaltigen Entwicklung vorab implementieren und folglich auch schneller realisieren. Damit thematisiert die Methode wichtige Ziele der Sustainable Development Goals (SDGs) der Vereinten Nationen [1], indem Lösungen sowohl zur Ressourcenschonung als auch für nachhaltige Produktionsverfahren und nachhaltiges Konsumverhalten entwickelt werden.

Exemplarisch wird der Nachhaltigkeitsdiamant am PSS „PSSycle“, ein im akademischen Umfeld entwickeltes Sharing-System für Elektrofahrräder vorgestellt. Bei PSS erfolgt die Koppelung von materiell greifbaren und immateriellen Gütern (vgl. [2], S. 35) und eröffnet neue Verkaufs- und Vertriebswege für Unternehmen. Dabei werden bereits in der Definition von PSS Anknüpfungspunkte an eine nachhaltige Entwicklung erkennbar: Ein PSS besteht demnach aus einer Kombination von Produkt- und Serviceanteilen, um den Nutzwert zu erhöhen. Dabei kann der wirtschaftliche Erfolg vom Materialverbrauch entkoppelt werden und somit der ökologische Einfluss einer ökonomischen Aktivität minimiert werden ([3], S. 1545-1546). Ebenso spricht Mont ([4], S. 239) davon, dass PSS so gestaltet werden können, dass sie im Gegensatz zu herkömmlichen Geschäftsmodellen wettbewerbsfähiger sind, die Kundenbedürfnisse besser zufriedenstellen und gleichzeitig einen geringeren Einfluss auf die Umwelt haben. Die Chance, das Ziel einer Reduzierung von Umwelteinflüssen zu erreichen steigt an, wenn bereits im Planungs- und Entwicklungsprozess von PSS das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung verankert wird. Dazu soll unser vorgestelltes Bewertungsverfahren beitragen, welches auf einem Teilaspekt der Dissertation von Kammerl [5] und der Studienarbeit von Bader [6] beruht. Der Nachhaltigkeitsdiamant ist zwar auch für traditionelle Produkte anwendbar, jedoch insbesondere für die Bewertung von PSS ausgelegt.

2. Aktueller Stand der Integration von Nachhaltigkeitsaspekten in die PSS-Entwicklung

In der frühen Phase einer Produktentwicklung sind Entscheidungen zu treffen, die große Auswirkungen auf den gesamten Lebenszyklus und somit großen Einfluss auf die Nachhaltigkeit sowohl des Produktergebnisses als auch auf den Produktionsprozess haben ([7], S. 174; [8], S. 295; [9], S. 61). Dazu zählen etwa Materialauswahl, Auslegung und Dimensionierung von Komponenten oder Betrachtung der Demontierbarkeit am Ende des Lebenszyklus. Insbesondere PSS ermöglichen durch alternative Nutzungs- und Besitzszenarios, die Nachhaltigkeitsbilanz positiv zu verändern ([10], S. 258 [11], S. 97). So muss im Falle eines Sharing-Systems nicht jeder einzelne Nutzer beispielsweise ein Fahrzeug besitzen, wodurch Ressourcen geschont werden und auch für den Einzelnen finanzielle Vorteile entstehen. Entwicklungsmethoden mit Bezug zur Nachhaltigkeit unterstützen dabei, das Leitbild gezielt von einer Belastung hin zu einer Möglichkeit für Innovationen zu verwandeln ([12], S. 201). Eine systematische Literaturstudie ([5], S. 44-51) identifiziert zwölf relevante Ansätze, welche dazu dienen, bei der Planung und Entwicklung nachhaltiger Produkte zielführend zu unterstützen. Die in der Literaturstudie erfassten Methoden zur Verbesserung der Nachhaltigkeit werden dabei in die drei Kategorien (1) vorwiegend entscheidungsunterstützend, (2) vorwiegend vorgehensbasiert und (3) vorwiegend messend eingeteilt (siehe Tabelle 1).

Entscheidungsunterstützende Methoden	Vorgehensbasierte Methoden	Messende Methoden
Multi-criteria decision-making [13]	The Whole-Systems and Life-Cycle method [12]	Sustainable Product Design Model [14]
A method for sustainable product development [15, 16]	Framework for Strategic Sustainable Development [16–18]	The Geocybernetic Assessment Matrix [19]
The scenario method [20, 21]	Environmental Improvement through Product Development [22]	Sustainability Measurement Method [23]
Quality Function Deployment for Environment [24]	A practical ‘road-map’ for integration of sustainability issues [25]	
Integrated Multimodal Decision Making Model [26]		

Tabelle 1: Relevante Methoden und Ansätze zur Verbesserung der Nachhaltigkeit – Einordnung (nach [5], S. 45)

Die Literaturstudie offenbart, dass viele der Methoden komplex sind, großes Expertenwissen im Bereich der Nachhaltigkeit verlangen und schließlich zu aufwendig in der Anwendung sind ([9], S. 70). Zudem wird aufgezeigt, dass eine Vielzahl von Methoden existiert, diese aber in der Industrie nur selten angewendet werden ([27], S. 405; [28], S. 43). Dies resultiert einerseits daraus, dass bestehende Ansätze eine andere Intention verfolgen. So fokussieren die Aktivitäten zur Verbesserung der Nachhaltigkeit auf die Bewertung von existierenden Produkten oder Fertigungsprozessen oder auf die Kombination der Nachhaltigkeitsaspekte mit eigenen unternehmerischen Zielen. Viele der Methoden benötigen zudem eine detaillierte Datenbasis und können folglich erst spät in der Entwicklung oder nur auf das existierende Produkt im Sinne eines Benchmarks angewendet werden ([5], S. 52). Sie eignen sich daher nur bedingt als Entscheidungsunterstützung und Kommunikationsmittel bei der Auswahl der Nachhaltigkeitsziele, die verfolgt und implementiert werden sollen.

3. Nachhaltigkeitsdiamant – Beschreibung des Ansatzes

Die Anwendung des Nachhaltigkeitsdiamanten beginnt bei der Erörterung nachhaltigkeitsrelevanter Probleme, woraus die Definition von Zielen und Zielwerten erfolgt, und endet schließlich in der Formulierung von Handlungsempfehlungen. Dementsprechend legt der präsentierte Ansatz

seine Schwerpunkte auf die Definition der Ziele, die Auswahl geeigneter Indikatoren und eine Visualisierung der Evaluierungsergebnisse. Der Ansatz richtet sich vornehmlich an Produktplaner, Produktmanager oder technische Verantwortliche an der Schnittstelle zwischen Anforderungsmanagement und Entwicklung, darunter Systemingenieure, Anforderungsmanager oder Entwickler. Ergebnis der Anwendung ist ein am Leitbild Nachhaltigkeit geprüft und definiertes PSS Konzept, das in der unternehmerischen Praxis an die Entwicklung zur weiteren Ausarbeitung übergeben werden kann.

3.1. Nachhaltigkeitsdiamant – Bewertungsrahmen

Der entwickelte Nachhaltigkeitsdiamant dient zur Bewertung des Ist- und Sollzustands, zur Dokumentation der Ergebnisse (in Form eines diamantenförmigen Diagramms) und schließlich zur Visualisierung der Nachhaltigkeit eines PSS. Grundwald und Kopfmüller ([29], S. 76-77) heben hervor, dass Nachhaltigkeitsleitlinien stets entsprechend dem konkreten Anwendungsfall angepasst werden müssen. In Anlehnung an publizierte Handlungsleitlinien für die Energieversorgung von Henricke und Bodach [30] und deren Anpassung zur Technologiebewertung nach Zink ([31], S. 70) nimmt der Nachhaltigkeitsdiamant Kategorien mit auf, welche die Nachhaltigkeit eines PSS beschreiben. Der Nachhaltigkeitsdiamant kann sowohl auf Neuentwicklungen als auch auf Weiterentwicklungen angewendet werden. Konzeptionell lassen sich auch die häufig

postulierten drei Säulen der Nachhaltigkeit integrieren, indem jeweils an der Schnittstelle zweier Säulen eine weitere Kategorie mit der Intention einer differenzierteren Darstellung ergänzt wird. Es resultiert ein sechsteiliges, auf PSS und deren Nutzung angepasstes Schema mit den Kategorien ökologische Kompatibilität,

Risiko, Sozialverträglichkeit, Nutzen, ökonomische Rentabilität und Ressourcen. In Abbildung 1 ist der Nachhaltigkeitsdiamant dargestellt. Ersichtlich sind die verwendeten Kategorien mit jeweiliger Erläuterung und der schematische Aufbau.

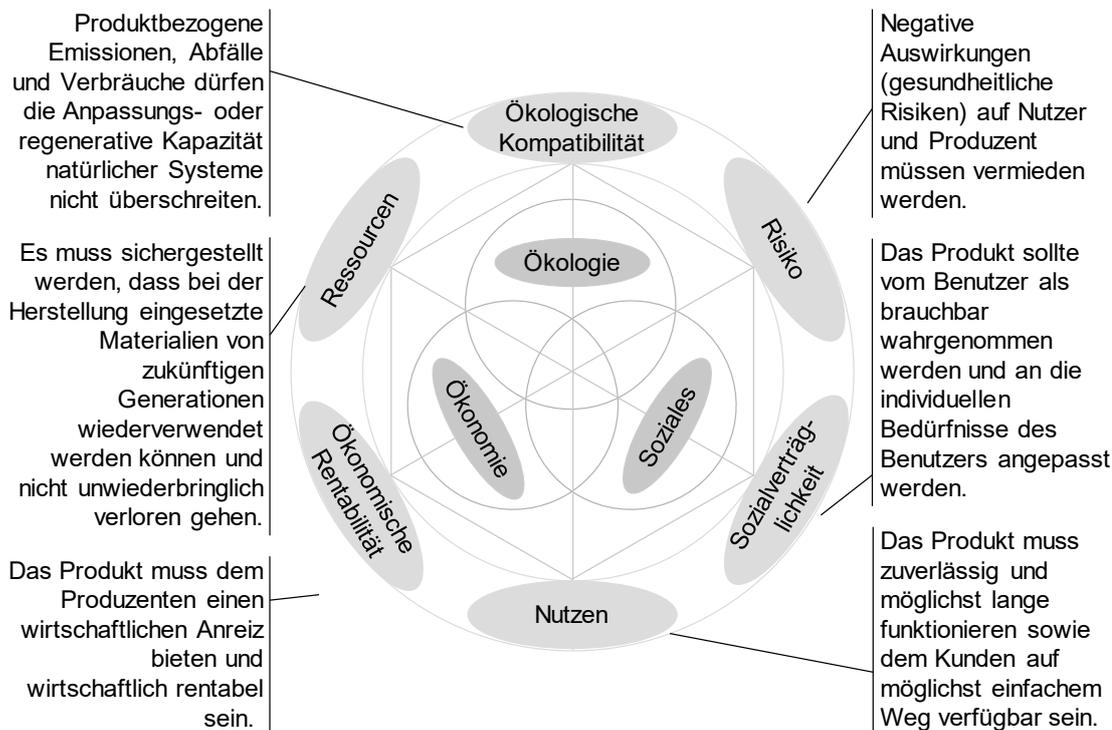


Abbildung 1: Nachhaltigkeitsdiamant und Definition der Kriterien nach Kammerl ([5], S. 71)

3.2. Nachhaltigkeitsdiamant – Beschreibung der Normierung und Gewichtung

Wie bereits erwähnt, existieren zur Nachhaltigkeitsbewertung von Produkten zahlreiche und vielfältige Indikatorensets (vgl. exemplarisch [32] oder [33]). Diese werden analysiert und zusammengefasst, um dem Entwickler einen breiten Fundus zu bieten und eine zielgerichtete Auswahl angepasst an den entsprechenden Entwicklungskontext zu ermöglichen. Die Indikatoren werden den Kategorien zugeordnet und ermöglichen damit deren Quantifizierung.

Um die Indikatoren innerhalb einer Kategorie vergleichen, gewichten und aggregieren zu können, werden die absoluten Messwerte in einer ersten Berechnung auf eine Skala von 0 bis 1 normiert. Die Logik der Normierung folgt der Gleichsetzung des schlechtesten Indikatorenwerts mit Null ($I=0$) und des besten anzunehmenden mit Eins ($I=1$). Die

Werte stammen aus Quellen wie internen Daten (z.B. Bilanzen), Benchmarks oder Gesetzen und Normen. Sowohl der Ist- als auch der Sollwert werden in diesem Intervall abgebildet. Im zweiten Berechnungsschritt erfolgt die Aggregation der Indikatoren innerhalb einer Kategorie. Die aggregierten Werte bilden im Nachhaltigkeitsdiamanten wiederum einen Intervallwert zwischen 0 und 1 auf der entsprechenden Achse ab. Dabei liegt der Wert Null im Zentrum, was somit dem geringsten Erfüllungsgrad von Nachhaltigkeit entspricht. Verbindet man die Achsenwerte der sechs Kategorien, stellt die resultierenden Polygonfläche ein Maß für Nachhaltigkeit eines PSS dar.

3.3. Nachhaltigkeitsdiamant – Anwendung der Methode

Als Basis für die Nachhaltigkeitsbewertung gilt es zunächst, die für den Anwendungsfall und Unternehmenskontext relevanten

Indikatoren, welche den sechs Kategorien des Nachhaltigkeitsdiamanten zugeordnet sind, auszuwählen. Dazu gehören etwa der CO₂-Ausstoß, die Anzahl an Arbeitsunfällen oder die Umsatzrentabilität. Anschließend werden der aktuelle Ist- sowie der angestrebte Sollzustand des PSS bestimmt, indem die zuvor ausgewählten Indikatoren quantifiziert werden. Die Sollwerte (I⁺) stammen dabei aus internen Daten, wissenschaftlichen Untersuchungen oder Umfragen beim Kunden.

Der Nachhaltigkeitsdiamant wird im Ergebnis von zwei Polygonen überlagert. Ein Polygon repräsentiert den Ist- und das andere Polygon den Sollzustand. Die Abweichung zwischen beiden Polygonen verdeutlicht das Ausmaß des Nachhaltigkeitsdefizits und lässt die Formulierung von Handlungsempfehlungen zu, um das Defizit bzw. die Defizite zu beheben. Die Bewertungsmethode sieht dabei sowohl auf Ebene der Kriterien als auch auf Ebene der Indikatoren eine Gewichtungsmöglichkeit vor, etwa durch Entscheidungsträger im Unternehmen oder durch Mitarbeiter der Abteilung für Produktentwicklung. Damit kann praxisorientiert eine Priorisierung der identifizierten Defizite und deren Lösungsempfehlungen gegeben werden.

4. Anwendungsfall „PSSycle“

Um die Funktionsweise des Nachhaltigkeitsdiamanten zu illustrieren, wird im Folgenden dessen beispielhafte Anwendung im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereiches 768 „Zyklusmanagement von Innovationsprozessen“ vorgestellt. In diesem Projekt wurde als Demonstrator ein Sharing-System für Elektrofahrräder, das sogenannte „PSSycle“ entwickelt. Dazu gehören die Fahrräder, eine Anwendung für Mobilgeräten sowie die zugehörige Serverinfrastruktur. Ziel dieses Projekts war es, den Großraum München mit ausleihbaren Elektrofahrrädern zu versorgen. Kunden, so die Intention, können Fahrräder an beliebigen Orten im Stadtgebiet je nach Verfügbarkeit ausleihen und an einem anderen Ort wieder abstellen. Ein existierendes Elektrofahrrad wurde zu diesem Zweck modifiziert (Bordcomputer, Schloss, ...) und eine Kommunikations- und Serverstruktur sowie eine geeignete Software für mobile Endgeräte entwickelt.

Zusammen stellten Fahrrad und Software die Ausgangslage für die nachhaltigkeitsorientierte Weiterentwicklung des reinen Produkts zum PSS dar. Um Verbesserungspotentiale ableiten zu können, wurden durch die Mitarbeiter des SFB einerseits die Daten des Systems aus der Erprobung analysiert, Kundenbefragungen durchgeführt sowie im Betrieb befindliche Wettbewerbsprodukte untersucht. Dabei wurden folgende Punkte herausgearbeitet, welche eine erste Indikation der Entwicklungsrichtung aufzeigen:

- Mangelnde Nachhaltigkeit existierender Lösungen (kurze Lebensdauer von Akkus, hoher Preis, schlechte Verfügbarkeit)
- Erhöhte Unfallgefahr durch höhere Geschwindigkeiten aufgrund der elektrischen Unterstützung
- Fokus der Kunden verstärkt auf den Themen Sicherheit und Gesundheit

Für die vorliegende Entwicklungsaufgabe wurden vom Entwicklungsteam insgesamt 18 Indikatoren (3 für jede Kategorie des Nachhaltigkeitsdiamanten) basierend auf den oben genannten Punkten als relevant erachtet, ausgewählt und anschließend deren Werte sowie deren Gewichtungen festgelegt. Die schlechtesten und besten möglichen Werte der Indikatoren stammen aus wissenschaftlichen Untersuchungen, aus Benchmarking oder Schätzungen basierend auf den Erfahrungen der an der Entwicklung der ersten Generation des „PSSycle“ beteiligten Entwickler. Die Gewichtungen basieren auf den Ergebnissen der Kundenbefragung und auf Diskussionen innerhalb des Entwicklungsteams. Das Ergebnis in Form einer Liste ist in Tabelle 1 zu finden.

Indikator Name / Beschreibung	Schlechtestmöglicher Wert	Bestmöglicher Wert	Ist-Wert	Soll-Wert	Einheit	Gewichtung
Ökologische Verträglichkeit						
CO ₂ -Emissionen bei der Herstellung des Akkus	8	4	5,87	5	kg	2
Durchschnittlicher Stromverbrauch pro gefahrene 100 km	1,5	0,5	0,85	0,7	kWh/km	4
Lösungsmittelanteil bei Lackierung des Rahmens	65	10	45	20	%	1
Gesundheitsgefahren (Risiken)						
Gemeldete Unfälle pro gefahrene 1.000 km	15	0	5	2,5	1/km	4
Gemeldete Anzahl an Personen, die ärztliche Versorgung nach einem Unfall benötigten pro gefahrene 1.000 km	5	0	2	0,5	1/km	8
Durchschnittliche Anzahl an ausgefallenen Arbeitsstunden bedingt durch Arbeitsunfälle pro Arbeitnehmer pro Jahr	20	0	12	5	h	1
Soziale Verträglichkeit (Usability)						
Einstellungsmöglichkeiten am Fahrrad (Sattel, Lenker, usw.) entsprechend der Größe des Nutzers	50	100	70	90	Perzentil	3
Anzahl der vorgegebenen unterschiedlichen Fahrprofile im Fahrradcomputer	0	10	3	5	[-]	1
Unangenehme Gelenkwinkel bei Nutzung der E-Bikes	0	5	2	0	[-]	2
Produktqualität & Verfügbarkeit						
Durchschnittliche Reichweite einer Akkuladung	50	150	65	100	km	3
Durchschnittliche Anzahl d. Ladezyklen eines Akkus, bis dieser nur noch 50% Gesamtkapazität besitzt	500	1500	550	750	[-]	1
Anzahl d. Lade- und Verleihstationen im Großraum München	0	200	35	75	[-]	2
Wirtschaftliche Rentabilität						
Entstandene Kosten pro Jahr pro Fahrrad durch Wartung, Reparatur und Service	500	50	150	100	€	1
Durchschnittlicher Gewinn pro Kunde, der mind. 3-mal ein E-Bike ausgeliehen hat	0	250	100	150	€	3
Herstellkosten pro E-Bike	4000	2000	2750	2500	€	1
Ressourcen						
Prozentanteil recycelter Rohstoffe im Akku	0	65	35	50	%	1
Anzahl der Teile, die nach dem Lebensende unverändert wiederverwendet werden können	0	35	5	15	[-]	1
Reparaturmöglichkeit des E-Bikes in Punkten	0	10	6	8	Punkte	1

Tabelle 2: Indikatoren als Basis für die Bewertung der Nachhaltigkeit des „PSSycle“ ([6], S. 41-43)

Die Ist- und Sollwerte werden in einem ersten Berechnungsschritt anhand Formel 1 normiert und aus den normierten Werten ein sogenanntes

Indikatordiagramm erstellt (siehe Abbildung 2). Die relative Abweichung von Ist- und Sollzustand wird als farbiger Balken dargestellt.

$$\text{normierter Wert}_{\text{Istzustand}} = \frac{\text{Wert}_{\text{schlechtestmöglich}} - \text{Wert}_{\text{Istzustand}}}{\text{Wert}_{\text{schlechtestmöglich}} - \text{Wert}_{\text{bestmöglich}}} \quad (1)$$

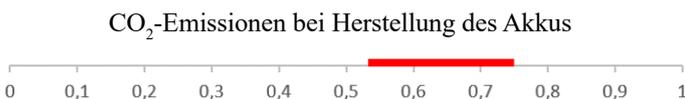


Abbildung 2: Indikatordiagramm „CO₂-Emissionen bei Herstellung des Akkus“ ([5], S. 85)

Nachhaltigkeitsdiamant – Bewertungs- und Implementierungsmethode für eine nachhaltigkeitsorientierte Produktentwicklung

Im zweiten Schritt wird mit Hilfe von Formel 2 der Istzustand für jede Kategorie aggregiert und

berechnet. Die Berechnung des Sollzustands erfolgt analog.

$$Istzustand_{Gesamt} = \frac{\sum_{i=1}^n Istzustand_i \times Gewichtungsfaktor_i}{\sum_{i=1}^n Gewichtungsfaktor_i} \quad (2)$$

Die berechneten Indexwerte für die Ist- und Sollzustände werden für jede Kategorie in einem Indikatordiagramm abgebildet. Die Indikatordiagramme der sechs Kategorien bilden schließlich den Nachhaltigkeitsdiamanten. Um Handlungsempfehlungen (siehe Tabelle 2) ableiten zu können, werden die Kategorien gewichtet und basierend auf den Abweichungen von Ist- und Sollzustand in eine Reihenfolge gebracht.

Für eine möglichst einfache praktische Anwendung der Methode wurde eine EXCEL™ Anwendung erstellt. Die Indikatoren sowie deren Werte und Gewichtung können in diese Anwendung übertragen werden, um die Berechnungen automatisiert durchführen zu lassen und schließlich den Nachhaltigkeitsdiamanten einfach und einheitlich graphisch zu visualisieren. Das Ergebnis dieser Visualisierung ist in Abbildung 3 zu sehen.

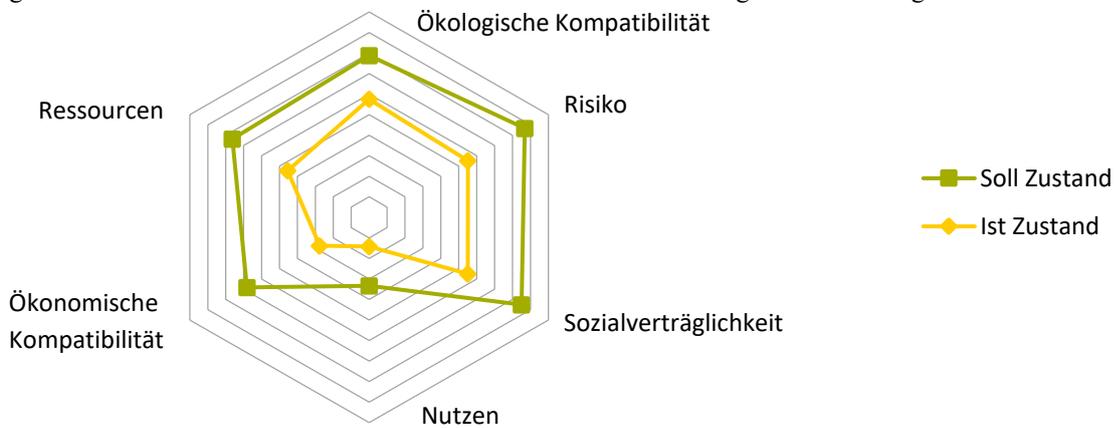


Abbildung 3: Nachhaltigkeitsdiamant der Bewertung des „PSSycle“ ([5], S. 97)

Aus dem Nachhaltigkeitsdiamanten kann aufgrund des Deltas zwischen dem Soll- und Ist Zustand die Größe des Nachhaltigkeitsproblems in den einzelnen Kategorien abgeleitet werden. Um auf das Ergebnis des abgeleiteten Handlungsbedarfs in Tabelle 2 zu kommen, werden zusätzlich die Gewichtungen der einzelnen Kategorien mit einbezogen. Die Auswertung des Bewertungsergebnisses offenbart, dass insbesondere die Kategorie

Risiko betrachtet werden muss, da diese die höchste Priorität erlangt hat und 21,9% des Gesamtproblems ausmacht. Die Berechnung erfolgt entsprechend Formel 2. Vorwiegend liegt dabei der Fokus auf den Gesundheitsgefahren, die von der höheren Fahrgeschwindigkeit, die durch die elektrische Unterstützung erreicht werden kann, ausgeht. Dazu zählt etwa die hohe Verletzungsgefahr.

Kategorie	Gewicht	Rang
Risiko	21,90 %	1
Sozialverträglichkeit	18,60 %	2
Nutzen	17,10 %	3
Ressourcen	14,80 %	4
Ökonomische Rentabilität	14,40 %	5
Ökologische Kompatibilität	13,20 %	6

Tabelle 3: Abgeleiteter Handlungsbedarf ([6], S. 90)

Basierend auf den identifizierten nachhaltigkeitsbezogenen Problemen, die aus den Handlungsbedarfen abgeleitet wurden, konnte das Entwicklungsteam Lösungsideen entwickeln, um die Nachhaltigkeit des „PSSycle“ zu verbessern. Diese Handlungsbedarfe umfassen (geordnet nach ihrer Relevanz von oben nach unten):

- Mangelnde Sicherheit für den Nutzer
- Hoher Energiebedarf im Betrieb
- Unklare Zusammensetzung des Strommix
- Hoher Materialbedarf bei Herstellung der Komponenten
- Nicht auf Gewinn ausgerichtetes Geschäftsmodell

Sie bilden die Grundlage für den nächsten Entwicklungszyklus. Nach dessen Abschluss folgt eine erneute Bewertung, um iterativ das System hinsichtlich seiner gesamten Nachhaltigkeit zu verbessern.

5. Bewertung und Diskussion

Die Anwendung des Nachhaltigkeitsdiamanten als Werkzeug zur Bewertung und Visualisierung unterstützt bei der Strukturierung und Beurteilung der Problemstellung sowohl in der frühen Phase einer Neuentwicklung als auch bei der Weiterentwicklung von bestehenden Produkten und PSS. Der Nachhaltigkeitsdiamant und seine Implementierung dienen als Entscheidungsunterstützung für einen mehrdimensionalen und komplexen Sachverhalt. Er stellt somit ein Rahmenwerk dar, welches die Auswirkungen der Strategien in den sechs definierten und an der Nutzung des PSS orientierten Kategorien der Nachhaltigkeit berücksichtigt. Die Auswertung der Ergebnisse der Nachhaltigkeitsbewertung werden anhand des Nachhaltigkeitsdiamanten graphisch veranschaulicht und leicht verständlich dokumentiert.

6. Ausblick

Während sich die Nachhaltigkeitsbewertung von bestehenden Produkten oder Dienstleistungen mittlerweile fest in Wissenschaft und Praxis etabliert hat und Angaben zum kumulierten CO₂-Ausstoß oder dem kumulierten Energieaufwand anerkannte Messgrößen sind, ist die Integration des Leitbildes einer nachhaltigen Entwicklung

in den Entwicklungsprozess vielfach noch nicht realisiert. Zum einen mag das Problem der fehlenden Daten, zum anderen der Mehraufwand in der Entwicklung abschreckend wirken. Andererseits lassen sich durch die Implementierung in die Entwicklungsphase bereits frühzeitig mögliche Defizite, aber auch Stärken aufzeigen, was später etwaige Folgekosten verhindern oder auch Wettbewerbsvorteile (z.B. Marketing) generieren kann. Auch geänderte Kundenwünsche und eine stärkere Sensibilisierung der Verbraucher für die Belange einer nachhaltigen Entwicklung zeigen diese Notwendigkeit auf.

Die vorgestellte Methode zeigt einen Weg auf, nachhaltige Entwicklung in innovative PSS zu integrieren und Stärken und Schwächen über den Nachhaltigkeitsdiamanten sichtbar zu machen. Die Vorgehensweise soll helfen, komplexe Sachverhalte messbar und vor allem graphisch darstellbar zu machen. Dies erleichtert einerseits die Integration in die Entwicklungsprozesse und baut andererseits Barrieren in Entscheidungsgremien ab, derartige Verfahren zu implementieren. Ohne die Bezüge zum normativen Leitbild aufzugeben, bietet der Ansatz ausreichend Spielraum, um auch auf andere Produkt- und Prozessentwicklungen übertragen zu werden. Dennoch bedarf es auch hier, wie auch bei der nachhaltigen Entwicklung selbst, einer stetigen Weiterentwicklung bzw. Anpassung und Korrektur.

7. Anmerkung

Die Inhalte dieses Beitrags sind im Rahmen des von der DFG geförderten Sonderforschungsbereich 768 „Zyklusmanagement von Innovationsprozessen“ entstanden. Die Inhalte basieren auf der Dissertation von Daniel Kammerl und der Studienarbeit von Simon Bader. Die beiden Arbeiten wurden am Lehrstuhl für Produktentwicklung der Technischen Universität München verfasst. Dabei wurden die Ergebnisse der Dissertation von Roland Zink in die Produktentwicklung transferiert.

8. Literatur

- [1] United Nations (UN) (2015): Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/70/1. Online verfügbar unter <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>.
- [2] Schenkl, Sebastian Alexander (2015): Wissensorientierte Entwicklung von Produkt-Service-Systemen. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs. Technische Universität München, München. Fakultät für Maschinenwesen/Lehrstuhl für Produktentwicklung.
- [3] Baines, T. S.; Lightfoot, H. W.; Evans, S.; Neely, A.; Grennough, R.; Peppard, J.; et al. (2007): State-of-the-art in product-service systems. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 221 (10), S. 1543–1552.
- [4] Mont, Oksana (2002): Clarifying the concept of product-service system. In: *Journal of Cleaner Production* 10 (3), S. 237–245.
- [5] Kammerl, Daniel (2018): Modellbasierte Planung von Produkt-Service-Systemen. Dissertation. Technische Universität München, München. Fakultät für Maschinenwesen/Lehrstuhl für Produktentwicklung.
- [6] Bader, S. (2017): Optimierung eines Ansatzes zur Entwicklung nachhaltiger Produkte. Semesterarbeit. Technische Universität München, München. Fakultät für Maschinenwesen/Lehrstuhl für Produktentwicklung.
- [7] Pigosso, Daniela Cristina Antelmi; McAloone, Tim C. (2015): Supporting the Development of Environmentally Sustainable PSS by Means of the Ecodesign Maturity Model. In: *Procedia CIRP* 30, S. 173–178.
- [8] Lindahl, Mattias; Sundin, Erik; Sakao, Tomohiko (2014): Environmental and economic benefits of Integrated Product Service Offerings quantified with real business cases. In: *Journal of Cleaner Production* 64 (February), S. 288–296.
- [9] Bovea, María Dolores; Pérez-Belis, Victoria (2012): A taxonomy of ecodesign tools for integrating environmental requirements into the product design process. In: *Journal of Cleaner Production* 20 (1), S. 61–71.
- [10] Tukker, Arnold (2004): Eight types of product-service system: eight ways to sustainability? Experiences from SusProNet. In: *Business Strategy and the Environment (Special Issue: Innovating for Sustainability)* 13 (4), S. 246–260.
- [11] Sundin, Erik; Lindahl, Mattias; Larsson, Henrik (op. 2010): Environmental and Economic Benefits of Industrial Product/Service Systems. In: Tomohiko Sakao (Hg.): *Industrial product-service systems (IPS²)*. Proceedings of the 2nd CIRP IPS² Conference [2010, Linköping, 14-15 April]. Linköping: Linköping University, S. 91–98.
- [12] Faludi, Jeremy (2015): A Sustainable Design Method Acting as an Innovation Tool. In: Amaresh Chakrabarti (Hg.): *ICoRD'15 – Research into Design Across Boundaries. Creativity, Sustainability, DFX, Enabling Technologies, Management and Applications (Bangalore, India) (Vol. 2)*, S. 201–212.
- [13] Buchert, Tom; Neugebauer, Sabrina; Schenker, Sebastian; Lindow, Kai; Starka, Rainer (2015): Multi-criteria Decision Making as a Tool for Sustainable Product Development – Benefits and Obstacles. In: *Procedia CIRP* 26, S. 70–75.
- [14] Howarth, George; Hadfield, Mark (2006): A sustainable product design model. In: *Materials & Design* 27 (10), S. 1128–1133.
- [15] Byggeth, Sophie; Broman, Göran; Robèrt, Karl-Henrik (2007): A method for sustainable product development based on a modular system of guiding questions. In: *Journal of Cleaner Production* 15 (1), S. 1–11.
- [16] Hallstedt, Sophie (2008): A foundation for sustainable product development.: Blekinge Institute of Technology, Karlskrona, Sweden.
- [17] França, César Levy; Broman, Göran; Robèrt, Karl-Henrik; Basile, George; Trygg, Louise (2017): An approach to business model innovation and design for strategic sustainable development. In: *Journal of Cleaner Production* 140, Part 1, S. 155–166.
- [18] Hallstedt, Sophie; Ny, Henrik; Robèrt, Karl-Henrik; Broman, Göran (2010): An approach to assessing sustainability integration in strategic decision systems for product development. In: *Journal of Cleaner Production* 18 (8), S. 703–712.

- [19] Philipps, Jason (2016): The Geocybernetic Assessment Matrix (GAM) — A new assessment tool for evaluating the level and nature of sustainability or unsustainability. In: *Environmental Impact Assessment Review* 56 (January), S. 88–101.
- [20] Severengiz, Semih; Gausemeier, Pia; Seliger, Günther; Pereira, Fernando Augusto (2011): Approach for Integration of Sustainability Aspects into Innovation Processes. In: Jürgen Hesselbach und Christoph Herrmann (Hg.): *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*. Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany, May 2nd - 4th, 2011. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 431–436.
- [21] Gaziulusoy, A. İdil; Boyle, Carol; McDowall, Ron (2013): System innovation for sustainability: a systemic double-flow scenario method for companies. In: *Journal of Cleaner Production* 45 (April), S. 104–116.
- [22] McAlloone, Tim C.; Bey, Niki (2009): Environmental improvement through product development. A guide. Copenhagen, Denmark: Danish Environmental Protection Agency.
- [23] Sarkar, Prabir; Rachuri, Sudarsan; Suh, Hyo Won; Lyons, Kevin W.; Sriram, Ram D. (2009): A Measure of Product Sustainability Based on Triple Bottom Line. In: Proceedings of the ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2009 (San Diego, CA, USA), S. 267–274.
- [24] Masui, Keijiro; Sakao, Tomohiko; Inaba, Atsushi (2001): Quality function deployment for environment: QFDE (1st report)-a methodology in early stage of DfE. In: Proceedings of the Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (11-15 Dec. 2001; Tokyo, Japan), S. 852–857.
- [25] Waage, Sissel A. (2007): Re-considering product design: a practical “road-map” for integration of sustainability issues. In: *Journal of Cleaner Production* 15 (7), S. 638–649.
- [26] Romli, Awanis; Prickett, Paul; Setchi, Rossitza; Shoe, Shwe (2013): A Conceptual Model for Sustainable Product Design. In: *Key Engineering Materials* 572, S. 3–6.
- [27] Pigosso, Daniela Cristina Antelmi; McAlloone, Tim C.; Rozenfeld, Henrique (2015): Characterization of the State-of-the-art and Identification of Main Trends for Ecodesign Tools and Methods: Classifying Three Decades of Research and Implementation. In: *Journal of the Indian Institute of Science* 95 (4), S. 405–427.
- [28] Bey, Niki; Hauschild, Michael Zwicky; McAlloone, Tim C. (2013): Drivers and barriers for implementation of environmental strategies in manufacturing companies. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 62 (1), S. 43–46.
- [29] Grunwald, Armin; Kopfmüller, Jürgen (2012): Nachhaltigkeit. 2., aktualisierte Aufl. Frankfurt a.M. [u.a.]: Campus-Verlag (Campus "Studium").
- [30] Hennicke, Peter; Bodach, Susanne; Supersberger, Nikolaus; Riechert, Dorle (2010): *Energierévolution. Effizienzsteigerung und erneuerbare Energien als neue globale Herausforderung*. München: Oekom Verlag.
- [31] Zink, Roland (2012): *Raum für Energie - Ein integratives Konzept zur Modellierung einer regionalen nachhaltigen Energieversorgung*. Dissertation. Universität Passau, Passau. Philosophische Fakultät/ Lehrstuhl für Anthropogeographie.
- [32] Issa, Isabela; Pigosso, Daniela Cristina Antelmi; McAlloone, Tim C.; Rozenfeld, Henrique (2015): Leading product-related environmental performance indicators: a selection guide and database. In: *Journal of Cleaner Production* 108, S. 321–330.
- [33] Hollauer, Christoph; Zäpfel, Martin; Kammerl, Daniel; Omer, Mayada; Lindemann, Udo (2016): Sustainability Indicators - Overview, Synthesis and future Research Directions. In: Mitsutaka Matsumoto, Keijiro Masui, Shinichi Fukushima und Shinsuke Kondoh (Hg.): *Sustainability through innovation in product life cycle design*. Selected Papers of the EcoDesign 2015 symposium (9th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing; Tokyo, Japan): Springer (Ecoproduction. Environmental issues in logistics and manufacturing), S. 9–16.



Dr.-Ing. Daniel Kammerl

Daniel Kammerl studierte Maschinenwesen mit den Fachrichtungen Fahrzeug- und Informationstechnik an der Technischen Universität München (TUM) und schloss im Jahr 2012 ab. Anschließend promovierte er am Lehrstuhl für Produktentwicklung der TUM zum Thema modellbasierte Entwicklung von Produkt-Service-Systemen (PSS) und erhielt dafür 2017 den Dokortitel. In seiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter beschäftigte er sich mit der Modellierung von PSS in der frühen Phase der Produktentwicklung, der Integration von Nutzungsdaten in die PSS-Planung und mit der Verbesserung der Nachhaltigkeit von Produkten und PSS. Seit 2018 ist er bei der Deutschen Bahn AG als technischer Projektleiter im Einkauf von Schienenfahrzeugen tätig.

Daniel Kammerl studied mechanical engineering with a specialization in automotive engineering and information technology at Technical University of Munich (TUM) in which he graduated in 2012. Subsequently, he did his doctorate on the subject of model-based development of product-service systems (PSS) at the Institute of Product Development at TUM and received his PhD in 2017. In his time as a research assistant, he dealt with the modeling of PSS in the early phase of product development, the integration of usage data in the PSS planning and the optimization of the sustainability of products and PSS. Since 2018 he has been working at Deutsche Bahn AG as a technical project manager in the procurement of rolling stock.

Kontakt / Contact

✉ daniel.kammerl@posteo.de



Prof. Dr. Roland Zink

Roland Zink promovierte an der Universität Passau zum Thema der Transformation des Energiesektors und der Gestaltung nachhaltiger Energieversorgungsstrukturen aus einer räumlichen Perspektive. Seit 2013 ist er Professor für Raumwissenschaften und Informationssysteme an der THD und wissenschaftlicher Leiter der Forschungsgruppe „Geoinformatik“ am Technologie Campus Freyung. Neben der weiteren Entwicklung raum-zeitlicher Energiemodelle konzentriert sich seine aktuelle Forschungstätigkeit auf innovative Partizipationsmöglichkeiten von Akteuren in räumlichen Planungsprozessen durch neue Medien sowie die Verbindung von Digitalisierung und nachhaltiger Entwicklung.

Roland Zink received his doctorate at the University of Passau on the subject of the transition of the energy sector and the designing of a sustainable energy supply under a spatial perspective. Since 2013, he has been Professor of Spatial Sciences and Information Systems at DIT and scientific head of the research group "Geoinformatics" at the Technology Campus Freyung. In addition to further developing spatio-temporal energy models, his current research focuses on innovative opportunities for public participation in spatial planning processes by means of new media and the link between digitization and sustainable development.

Kontakt / Contact

✉ roland.zink@th-deg.de