

# Anwendung von Blockchain im PCF-Datenmanagement der Supply Chain

Yannick Eccard

Siemens Healthineers AG  
Allee am Röthelheimpark 2  
91054 Erlangen  
yannick.eccard@siemens-healthineers.com

Florian Haas

Hochschule Pforzheim  
Tiefenbronner Str. 65  
75175 Pforzheim  
florian.haas@hs-pforzheim.de

## Schlüsselwörter

Blockchain, Datenmanagement, Supply Chain Management, Greenhouse Gas Protocol, Product Carbon Footprint

## Problemstellung und Zielsetzung

Die globale Gesundheit ist durch den fortschreitenden Klimawandel akut bedroht. Hitzewellen, Dürren, Stürme und Überschwemmungen treffen besonders gefährdete Bevölkerungsgruppen und führen bereits heute zu Gesundheitsproblemen. Hauptverursacher des Klimawandels ist die Verbrennung fossiler Brennstoffe, die nicht nur zu erheblicher Luftverschmutzung führt, sondern auch jährlich mehr als sieben Millionen vorzeitige Todesfälle verursacht. Länder mit niedrigem Einkommen und schwachen Gesundheitssystemen sind besonders gefährdet (Josh et al. 2019, S. 9 f.).

Der weltweite CO<sub>2</sub>-Ausstoß hat im Jahr 2022 37,15 Milliarden Tonnen erreicht (Global Carbon Project 2024). Die Hauptverursacher dieser Emissionen sind der Energiesektor (38%), der Transportsektor (21%) und die industrielle Verbrennung (17%) (Crippa et al. 2024). In den letzten 60 Jahren ist die globale Durchschnittstemperatur um knapp 1 Grad Celsius gestiegen (Lindsey Rebecca und Dahmann Luann 2024). Dieser scheinbar geringe Anstieg hat bereits weitreichende Folgen, wie die eingangs beschriebenen zunehmenden extremen Wetterereignisse, schmelzende Gletscher und steigende Meeresspiegel (Intergovernmental Panel on Climate Change 2023).

Um die Folgen der globalen Erwärmung zu begrenzen, ist eine drastische Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes notwendig. Die Energiewende zu erneuerbaren Energien, die Dekarbonisierung der Industrie und eine nachhaltige Verkehrswende sind zentrale Schritte, um diese Herausforderung zu bewältigen.

Die Messung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist daher ein wichtiger Schritt, um den eigenen Beitrag eines Unternehmens zur globalen Erwärmung zu verstehen und zu reduzieren. Durch die Identifizierung der größten Emissionsquellen können gezielte Maßnahmen zur Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes ergriffen werden. Um den Beitrag eines Unternehmens zum Klimawandel zu erfassen, hat sich das Greenhouse Gas (GHG) Protocol als führendes Mess- und Berichtssystem etabliert. Es teilt die Treibhausgasemissionen eines Unternehmens in drei Kategorien ein:

Scope 1: umfasst direkte Emissionen

Scope 2: umfasst indirekte Emissionen aus eingekaufter Energie,

Scope 3: umfasst weitere indirekte Emissionen durch die vor- und nachgelagerte Lieferkette (World Resources Inst 2004).

Die Herausforderung bei der Messung des Scope 3 besteht darin, den sogenannten Product Carbon Footprint (PCF) zu messen. Der PCF gibt an, wie viele Treibhausgase während des gesamten Lebenszyklus eines Produkts von der Herstellung bis zur Entsorgung freigesetzt werden. Die präzise Erfassung und Verwaltung dieser Daten ist entscheidend, um Unternehmen und Regierungen dabei zu unterstützen, ihre Umweltauswirkungen zu reduzieren und nachhaltiges Handeln zu fördern (Hottenroth, Joa und Schmidt 2014, S. 4 f.).

Das übergeordnete Ziel ist die Verbesserung der Nachhaltigkeit entlang der Lieferkette durch die Reduktion des PCF. Um die Ziele der Emissionsreduktion in Scope 3 erreichen zu können, ist es zunächst notwendig, diese messbar zu machen. Dazu werden Primärdaten benötigt, also Daten, die für einen bestimmten Prozess in einem untersuchten Produktsystem erhoben werden. Das Hauptaugenmerk liegt jedoch auf der Bewältigung der Herausforderungen beim Austausch von PCF-Daten. Herkömmliche Kommunikationsmittel wie Papierdokumente und E-Mails erweisen sich als problematisch, da sie Risiken wie Datenverlust und -verfälschung bergen. Zudem erschwert die fehlende Standardisierung bei der Berechnung des PCF die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Produkten und Unternehmen (Villena und Gioia 2020).

Die Blockchain-Technologie gilt als vielversprechender Lösungsansatz. Blockchain ermöglicht einen transparenten und vertrauenswürdigen Austausch von PCF-Daten entlang der Lieferkette. Die Dezentralisierung und Unveränderbarkeit von Daten in Blockchain-Systemen soll nicht nur die derzeitigen Schwierigkeiten im Datenmanagement überwinden, sondern auch die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Akteuren fördern und die Überwachung von Nachhaltigkeitsstandards erleichtern (Iansiti und Lakhani 2017).

Die Implementierung von Blockchain-Systemen könnte somit nicht nur dazu beitragen, die Herausforderungen im Datenmanagement zu bewältigen, sondern auch die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Akteuren in

der Lieferkette zu stärken. Darüber hinaus würde sie eine verlässliche Grundlage für die Überwachung und Verbesserung von Nachhaltigkeitsstandards schaffen. Dieser innovative Ansatz könnte somit einen wichtigen Beitrag zur Förderung der Nachhaltigkeit in der Lieferkette des Gesundheitswesens leisten.

Da es sich bei der Blockchain Technologie um eine vergleichsweise neue Technologie handelt, bestehen nach wie vor Herausforderungen, die gelöst werden müssen und insbesondere die Anwendung im Supply Chain Management befindet sich noch im Anfangsstadium (Wamba und Queiroz 2020, S. 2 f.). Die Bewertung erfolgt deshalb im Vergleich zu zwei etablierten Möglichkeiten, der Datenverwaltung mittels der Cloud-Technologie und mittels eines SAP Add-Ons. Cloud-Lösungen bieten Flexibilität und Skalierbarkeit, während ein SAP Add-On die Integration in bestehende Systeme erleichtert. Jeder Ansatz besitzt eigene Vor- und Nachteile

### **Methodisches Vorgehen**

Ziel dieser Studie ist es, die Potenziale der Blockchain-Technologie im Bereich des PCF-Datenmanagements entlang der Supply Chain zu bewerten. Der Fokus liegt dabei auf der Untersuchung der Möglichkeiten und Herausforderungen, die die Blockchain-Technologie in diesem Kontext bietet. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Frage, inwieweit die Blockchain-Technologie einen positiven Beitrag zur Erfassung, Verwaltung und Auswertung von PCF-Daten leisten kann. Die Bewertung der Blockchain-Technologie erfolgt dabei am Beispiel einer bereits in der Chemiebranche implementierten Lösung (Siemens AG 2023): SiGREEN, entwickelt von der Siemens AG, mit der blockchainbasiert aktuelle CO<sub>2</sub>-Werte beim Entstehen vor Ort erfasst und entlang der gesamten Lieferkette aggregiert werden können (Siemens AG 2023).

Die Ziele dieser Arbeit umfassen zunächst die Darstellung der theoretischen Grundlagen der PCF-Datenerfassung und des Sustainable Supply Chain Managements. Dabei sollen auch die Schwierigkeiten bei der Datenerhebung sowie die Vorteile und Grenzen der PCF-Datenerhebung beleuchtet werden. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf den Anforderungen an die Erfassung, das Management und die Auswertung von PCF-Daten entlang der Wertschöpfungskette.

Besonderes Augenmerk wird darauf gelegt, die Vorteile der Blockchain-Technologie im Vergleich zur Cloud-Technologie und einem SAP Add-On für das PCF-Datenmanagement zu identifizieren. Dabei sollen die spezifischen Mehrwerte der Blockchain-Lösung im Kontext der Supply Chain herausgearbeitet werden. Dazu werden die verschiedenen Technologien in mehreren Kategorien miteinander verglichen. Diese umfassende Analyse bildet die Grundlage für eine ganzheitliche Bewertung der Einsatzmöglichkeiten der Blockchain-Technologie im PCF-Datenmanagement entlang der Supply Chain.

### **Nachhaltiges Supply Chain Management**

Nachhaltiges Supply Chain Management (SCM) hat sich zu einem zentralen Ansatz entwickelt, der Unternehmen hilft, ökonomische, ökologische und soziale Ziele in Einklang zu bringen. In einer Zeit wachsenden Umweltbewusstseins spielt nachhaltiges SCM eine entscheidende Rolle bei der Gestaltung von Lieferketten, die nicht nur wirtschaftliche Effizienz, sondern auch ökologische Integrität und soziale Gerechtigkeit fördern (Rajeev et al. 2017, S. 299 ff.).

Green Supply Chain Management (GSCM) zielt darauf ab, Umweltmanagementprinzipien in die Kernwerte des Unternehmens zu integrieren, um ein effizientes Design, Beschaffung, Produktion, Distribution, Nutzung und Recycling zu erreichen. Der Erfolg von GSCM hängt entscheidend davon ab, inwieweit Umweltinformationen entlang der Lieferkette erfasst, gemessen, ausgetauscht und in ein kohärentes System integriert werden können (Şen und Clark 2009, S. 95; Srivastava 2007, S. 53). Trotz der Standardisierung von Umweltverträglichkeitsprüfungen in einigen Branchen, wie z.B. der Lebensmittelindustrie, sind Kooperationen zur Messung von Umweltauswirkungen und zum Management relevanter Umweltrisiken und -chancen im GSCM noch relativ neu (Xing, Qian und Zaman 2016, S. 1).

Besondere Herausforderungen ergeben sich bei der Verwaltung von Ökobilanzdaten (Life Cycle Inventory - LCI) für die Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment - LCA) und das Lebenszyklusmanagement (Life Cycle Management - LCM) in Lieferketten, da bestehende Datenbanken aus Sekundärdaten oft nur begrenzte und durchschnittliche Branchenpraktiken repräsentieren (Xing, Qian und Zaman 2016, S. 1 f.). Dies führt zu unzureichenden Daten für die Bewertung der Umweltleistung über den gesamten Lebenszyklus von Produkten und Dienstleistungen in dynamischen Lieferkettennetzwerken (Browne und Allen 2004, S. 13 f.).

### **Grundlagen des Product Carbon Footprint (PCF)**

Das Pariser Klimaabkommen und globale Green Deals wie der europäische Green Deal bilden den Rahmen für Unternehmen, Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Der europäische Green Deal (European Commission 2023) fördert Klimaneutralität und Kreislaufwirtschaft auf der Grundlage von Lebenszyklusanalysen. Die Einführung digitaler "Produktpässe" mit Umweltleistungsindikatoren, einschließlich PCF und Recyclinginformationen, soll öffentliche und private Verbraucher stärken, erfordert jedoch enge Zusammenarbeit und Datenaustausch entlang der Wertschöpfungskette (Jaeger et al. 2022, S. 1).

### **Produktlebensweg**

Die Analyse der Klimaauswirkungen von Produkten bedarf eines methodisch fundierten Ansatzes, der den gesamten Lebensweg berücksichtigt. Der Lebenszyklusansatz existiert seit den 1980er Jahren und hat seit den

1990er Jahren vor allem durch die Integration in die Ökobilanzierung (LCA) an Bedeutung gewonnen. (Hottenroth, Joa und Schmidt 2014, S. 8) ISO-Normen wie ISO 14040 und ISO 14044 haben diesen Ansatz international standardisiert. Ziel der Ökobilanzierung ist es, alle Umweltwirkungen eines Produktes über seinen gesamten Lebensweg zu erfassen, wobei der Schwerpunkt auf dem Klimawandel liegt, es werden aber auch andere Umweltaspekte berücksichtigt (Umweltbundesamt 2018).

Die Einbeziehung des gesamten Lebensweges ist entscheidend für die Vergleichbarkeit von Produkten und die Identifizierung effektiver Klimaschutzmaßnahmen. Der Lebensweg umfasst Rohstoffgewinnung, Produktion, Nutzung, Verbrauch und Entsorgung. Der PCF-Ansatz berücksichtigt sowohl den Abbau als auch die Emission von Treibhausgasen aus fossilen und biogenen Quellen, was beispielsweise bei Vergleichen von Elektro- und Dieselfahrzeugen eine ganzheitliche Betrachtung des Lebensweges und damit eine genaue Bewertung der Klimawirksamkeit von Produkten ermöglicht (Hottenroth, Joa und Schmidt 2014, S. 8 f.).

### **Definition des PCF**

Der "Carbon Footprint" bezeichnet die systematische Messung von Treibhausgasemissionen auf verschiedenen Ebenen: Länder, Regionen, Unternehmen, Individuen, Produkte und Dienstleistungen. Insbesondere wird zwischen produkt- und unternehmensbezogenen Bilanzen unterschieden (ISO 2022).

Der Product Carbon Footprint (PCF) erfasst umfassend die Treibhausgasemissionen und -absorptionen über den gesamten Lebenszyklus von materiellen Gütern und immateriellen Dienstleistungen. Der Fokus liegt auf spezifisch definierten funktionalen Einheiten und im Gegensatz zum Begriff "Carbon Footprint" berücksichtigt der PCF alle Treibhausgase gemäß Kyoto-Protokoll, nicht nur CO<sub>2</sub>-Emissionen (Hottenroth, Joa und Schmidt 2014, S. 9).

### **Nutzen des PCF**

Die PCF-Methode bietet vielfältige Anwendungsmöglichkeiten und Zielsetzungen, wobei der konkrete Nutzen für bilanzierende Organisationen stark von deren individuellen Zielsetzungen abhängt. Der übergeordnete Nutzen liegt in der Unterstützung von Unternehmen bei einer nachhaltigen Produktion. Die Messung und Bewertung der Klimarelevanz von Produkten schafft Transparenz über die produktbezogenen Treibhausgasemissionen entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Diese Transparenz ermöglicht gezielte Maßnahmen zur Emissionsminderung. Der Mehrwert liegt dabei weniger in der absoluten Zahl als vielmehr in den individuellen Beiträgen zu dieser Zahl, die die gewünschte Transparenz erst ermöglichen (He et al. 2019, S. 1 ff.).

### **Bestehende Standards der PCF-Erfassung**

Die konsistente methodische Grundlage für die Erfassung von Product Carbon Footprints (PCFs) wurde durch die britische PAS 2050 aus dem Jahr 2008 gelegt. Parallel dazu wurden internationale Standards durch die Greenhouse Gas Protocol Initiative (WIR/WBCSD) und die International Organization for Standardization (ISO 14067) entwickelt (GHG Protocol PAS 2050 2008, S. 1 f.).

Nationale Initiativen existieren ebenfalls, zielen aber häufig auf nationale Produktkennzeichnungsstandards ab. Diese führen jedoch nicht zu einer einheitlichen Bewertung der Klimarelevanz von Produkten. Eine internationale Entwicklung und Standardisierung, manifestiert durch ISO-Normen oder den GHG Product Standard, ist entscheidend, um eine konsistente Bewertung der Klimawirksamkeit von Produkten zu gewährleisten (Hottenroth, Joa und Schmidt 2014, S. 12; Lewandowski, Ullrich und Gronau 2021, S. 17 ff.).

### **Einbezug der Lebenswegphasen bei PCF-Erfassung**

Der PCF von der „Wiege bis zur Bahre“ (cradle-to-grave) deckt den gesamten Lebenszyklus eines Produkts ab und identifiziert Emissionsverlagerungen zwischen den Phasen. Der GHG Product Standard fordert diese Systemgrenze insbesondere für Endprodukte und einige Zwischenprodukte, deren Verwendung bekannt ist. Der Ansatz von der „Wiege bis zum Werkstor“ (cradle-to-gate) konzentriert sich auf die Umweltauswirkungen bis zum Verlassen des Unternehmens, schließt aber Nutzung und Entsorgung aus, was zu einem partiellen PCF führt (Hottenroth, Joa und Schmidt 2014, S. 30).

Bei unbekannter Endnutzung erlaubt der Standard Cradle-to-gate-Ansätze, empfiehlt aber repräsentative Nutzungsprofile. Die Einbeziehung von Nutzung und Entsorgung identifiziert Emissionsminderungspotenziale für einen vollständigen PCF. Bei cradle-to-gate-Bilanzen sollte die Systemgrenze deutlich gemacht werden, im Gegensatz zu ISO 14067, die gate-to-gate-PCFs erlaubt, was im GHG Product Standard und PAS 2050 nicht vorgesehen ist (Hottenroth, Joa und Schmidt 2014, S. 30 f.).

### **Gesamte Lieferkette vs. First-Tier Betrachtung**

Um aussagekräftige Ökobilanzdaten zu generieren, sind durchgängige Anstrengungen entlang der Wertschöpfungskette erforderlich. Informationen von hoher Zuverlässigkeit sind oft auf das ausführende Unternehmen beschränkt, während das Wissen über nachgelagerte Prozesse begrenzt ist. Da externe Prozesse den größten Beitrag zum Fußabdruck leisten, haben einzelne Unternehmen nur begrenzte Möglichkeiten, belastbare PCFs zu erstellen (Jaeger et al. 2022, S. 2).

Derzeit basieren LCA-Ergebnisse hauptsächlich auf Annahmen und Durchschnittswerten und nicht auf einzelnen Wertschöpfungsketten, was dazu führt, dass Verbraucher und Unternehmen zögern, ihre Entscheidungen darauf zu

stützen. Die Überwindung dieser Herausforderung erfordert einen zuverlässigen Informationsaustausch zwischen den Akteuren der Branche, um die Konsistenz der Fußabdruck-informationen zu gewährleisten (Jaeger et al. 2022, S. 2; Villena und Gioia 2020).

### Vorteile bei Betrachtung der Lieferkette

Im Folgenden werden die Vorteile einer Betrachtung der PCF-Daten entlang der gesamten Wertschöpfungskette dargestellt. Dabei wird auch auf die Nachteile einer ausschließlichen Betrachtung der PCF-Daten der ersten Stufe eingegangen.

1. **Umfassendes Verständnis der Emissionen:** Die Erfassung von PCF-Daten entlang der gesamten Wertschöpfungskette ermöglicht ein umfassenderes Verständnis der Emissionen im Vergleich zur ausschließlichen Betrachtung der First-Tiers (Jaeger et al. 2022, S. 7; Villena und Gioia 2020).
2. **Einbeziehung aller Stakeholder:** Die Einbeziehung der gesamten Lieferkette fördert einen ganzheitlichen Nachhaltigkeitsansatz und ermöglicht die Zusammenarbeit aller Stakeholder im Gegensatz zur Vernachlässigung anderer relevanter Stakeholder bei einer Fokussierung auf First-Tiers (Jaeger et al. 2022, S. 1 f.).
3. **Risikomanagement und -kontrolle:** Die umfassende Datenspeicherung ermöglicht ein effektiveres Risikomanagement, indem potenzielle Umweltrisiken entlang der gesamten Lieferkette identifiziert werden, während bei einer Beschränkung auf die ersten Stufen Risiken in anderen Teilen übersehen werden könnten (Smith, Zurynski und Braithwaite 2022, S. 2170 f.).
4. **Umfassende Nachhaltigkeitsbewertung:** Die Speicherung von PCF-Daten über die gesamte Lieferkette ermöglicht eine umfassendere Nachhaltigkeitsbewertung unter Berücksichtigung indirekter Emissionen, im Gegensatz zu der eingeschränkten Perspektive bei einer Fokussierung auf die ersten Stufen (Xing, Qian und Zaman 2016, S. 197).
5. **Einbeziehung von Sub-Tiers und Vorlieferanten:** Die Betrachtung der gesamten Lieferkette ermöglicht die Einbeziehung von Sub-Tiers und Vorlieferanten, während bei einer Fokussierung auf First-Tiers diese wichtigen Akteure und ihre Beiträge zur Emissionsminderung vernachlässigt werden können. Zudem sind in der Regel die stärksten THG Emittenten am Anfang der Lieferketten zu finden (Hottenroth, Joa und Schmidt 2014, S. 79 f; Villena und Gioia 2020).

6. **Transparenz und Rückverfolgbarkeit der Lieferkette:** Eine umfassende Erfassung fördert die Transparenz und Rückverfolgbarkeit von Emissionsdaten und unterstützt die Kommunikation der Nachhaltigkeitsleistung im Vergleich zur eingeschränkten Sichtweise bei einer Fokussierung auf die ersten Stufen (Jaeger et al. 2022, S. 1 f; Villena und Gioia 2020).
7. **Lieferanten in Nachhaltigkeitsziele einbinden:** Die Einbeziehung der gesamten Lieferkette ermöglicht eine stärkere Einbindung der Lieferanten in die Nachhaltigkeitsziele durch den Austausch von Daten und die Entwicklung gemeinsamer Lösungen im Gegensatz zur Vernachlässigung dieser Möglichkeiten bei einer Fokussierung auf die ersten Stufen (Hottenroth, Joa und Schmidt 2014, S. 79 f; Villena und Gioia 2020).

### Datenmanagement von PCF-Daten

Zur Erfassung und Auswertung der PCF-Daten bieten sich drei unterschiedliche Ansätze an: Blockchain-Technologie, Cloud-Lösungen und SAP-Add-on.

Blockchain bietet Sicherheit und Unveränderbarkeit, Cloud-Lösungen Flexibilität und SAP-Add-On erleichtert die Integration in Unternehmenssysteme. Als Beispiel für die Blockchain-Technologie wird das Tool SiGREEN von Siemens vorgestellt, gefolgt von einer kurzen Darstellung der beiden alternativen Lösungen. Im nächsten Schritt werden die Anforderungen an eine Technologie für das PCF-Datenmanagement entwickelt und eine vergleichende Bewertung anhand der entwickelten Kriterien vorgenommen.

### Blockchain-Technologie (SiGREEN)

SiGREEN revolutioniert das PCF-Datenmanagement durch den Einsatz der Blockchain-Technologie. Die Plattform stellt die Integrität, Transparenz und Zuverlässigkeit von PCF-Daten sicher, indem sie diese in einer unveränderlichen Blockchain verankert. SiGREEN schafft eine dezentrale Umgebung für die Zusammenarbeit relevanter Akteure in der Wertschöpfungskette, um präzise PCF-Daten zu sammeln und zu verifizieren. Die Plattform basiert auf bestehenden Standards zur Datenerfassung und ermöglicht die Verifizierung durch Zertifizierungsstellen (Windkraft Journal 2021).

Jeder CO<sub>2</sub>-Wert ist mit einem verifizierbaren digitalen Nachweis verknüpft und bildet die Grundlage für eine datengetriebene Produktdekarbonisierung. Die Plattform kann eigenständig oder in bestehende Systeme integriert werden und ermöglicht die kostengünstige Bereitstellung von Emissionsdaten, auch für Zulieferer. Durch den direkten Austausch dynamischer CO<sub>2</sub>-Daten entlang der gesamten Lieferkette ermöglicht SiGREEN datenbasierte Entscheidungen zur Emissionsreduktion (Siemens AG 2023).

Mit einem bereits produktiv laufenden System und einem Pilotprojekt (TFS Initiative 2024) in der chemischen Industrie unterstreicht SiGREEN seine Eignung als PCF-Datenmanagement-Tool. Die Plattform verbessert die Qualität, Transparenz und Glaubwürdigkeit von PCF-Daten und ermöglicht fundierte Entscheidungen für Emissionsminderungs- und Nachhaltigkeitsstrategien. (Siemens AG 2023) Die erhöhte Transparenz stärkt das Vertrauen der Verbraucher in die berichteten Umweltauswirkungen von Produkten, was sich positiv auf die Markenreputation auswirken kann (Shakhbulatov et al. 2019, S. 546 ff.).

### Cloud-Lösung

Eine Cloud-Lösung für das PCF-Datenmanagement ermöglicht Unternehmen die Erfassung, Analyse und Verwaltung von Umweltbelastungsdaten ihrer Produkte in Echtzeit. Durch die Nutzung der Cloud können Unternehmen ihre Daten sicher speichern und flexibel auf sie zugreifen, unabhängig von Standort und Gerät. Die Skalierbarkeit der Cloud ermöglicht es, sich an verändernde Anforderungen anzupassen, ohne teure Hardware-Upgrades durchführen zu müssen. Zudem bietet die Cloud-basierte Lösung verbesserte Kollaborationsmöglichkeiten, da Teams gleichzeitig auf die Daten zugreifen und gemeinsam an Projekten arbeiten können. Die Automatisierung von Prozessen in der Cloud optimiert die Effizienz und ermöglicht eine schnellere Bereitstellung von Berichten und Analysen, was wiederum zu fundierteren Entscheidungen und einer verbesserten Nachhaltigkeitsperformance führt (Xing, Qian und Zaman 2016, S. 3 ff.).

### SAP-Add-On

Die Implementierung von SAP Add-On-Lösungen im PCF-Datenmanagement bietet ebenso eine vielversprechende Möglichkeit, um die Effizienz und Genauigkeit der Umweltdatenverwaltung zu steigern. Wichtig ist hierbei zu erwähnen, dass es sich in diesem Ansatz um eine Möglichkeit handelt, Stammdaten in SAP zu erweitern und mit Umweltdaten zu ergänzen.

### Kategorien für das PCF-Datenmanagement

Die Definition der Anforderungen an ein PCF-Datenmanagementsystem ist entscheidend für die genaue Erfassung und Analyse von PCF-Daten. In diesem Kapitel werden die wesentlichen Kriterien eines solchen Systems erläutert.

Die Anforderungen an das PCF-Datenmanagement sind entscheidend, um die Konsistenz, Integrität und Nachvollziehbarkeit von Daten zu gewährleisten. Dies unterstützt fundierte Entscheidungsprozesse, die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften und verbessert die betriebliche Effizienz. Ein effektives Datenmanagement minimiert Risiken, reduziert Kosten und ermöglicht eine optimierte Nutzung von Ressourcen, was für die strategische Planung und den langfristigen Erfolg unerlässlich ist.

Die Anforderungen an ein PCF-Datenmanagement lassen sich grundsätzlich aus den Anforderungen an ein allgemeines und insbesondere Forschungsdatenmanagement ableiten (Earley und Henderson 2017, S. 217 ff; Ludwig und Enke 2013, S. 22 f.). Diese wurden auf Basis der allgemeinen Anforderungen der ‚Together for Sustainability Initiative‘ (TFS Initiative 2024) sowie des Instituts für Energie, Ökologie und Ökonomie (DFGE 2024) um zwei weitere spezifische Faktoren, nämlich Ressourceneffizienz und Umweltstandards ergänzt. So wurden die nachfolgenden 10 Kern-Anforderungen identifiziert:

1. **Datenintegrität:** Schutz vor Manipulation für korrekte und verlässliche PCF-Daten.
2. **Datensicherheit:** Sicherer Schutz vor unberechtigtem Zugriff für Vertraulichkeit und Integrität.
3. **Skalierbarkeit und Flexibilität:** Verarbeitung großer Datenmengen, Skalierbarkeit für zukünftiges Wachstum, Flexibilität für weitere umweltrelevante Daten.
4. **Kosten:** Minimierung der Kosten für Implementierung und Nutzung im Rahmen des Budgets.
5. **Datenzugang und -freigabe:** Sicherstellung der Verfügbarkeit und Nutzbarkeit der Daten sowohl zum internen Gebrauch als auch für externe Partner.
6. **Interoperabilität:** Nahtlose Interaktion mit Unternehmenssystemen für einen effizienten Datenfluss.
7. **Reporting-Funktionalität:** Generierung automatisierter Berichte und Analysen zur transparenten Darstellung der PCF-Daten für interne und externe Stakeholder.
8. **Benutzerfreundlichkeit:** Intuitive Benutzeroberfläche für einfache Navigation und Interaktion, auch für externe Nutzer.
9. **Ressourceneffizienz:** Minimierung des Ressourcenverbrauchs und der Umweltbelastung.
10. **Anwendung von Umweltstandards:** Einhaltung von nationalen und internationalen Standards wie dem Greenhouse Gas Protocol und Auditvorgaben.

### Analyse der Technologien zu den Kategorien

Die Blockchain-Technologie in SiGREEN und Cloud-Lösungen sowie SAP Add-ons im PCF-Datenmanagement zeigen jeweils Vor- und Nachteile in verschiedenen Kategorien. Die empfohlene Lösung pro Anforderung wird gesondert hervorgehoben. Dabei werden die Technologien pro Anforderung jeweils folgendermaßen mit Punkten bewertet:

- 3 Punkte → Empfohlene Lösung bei dieser Anforderung
- 2 Punkte → Anforderung voll erfüllt
- 1 Punkt → Anforderung teilweise erfüllt

### 1. Datenintegrität

- Blockchain (SiGREEN): Dezentrale und unveränderbare Aufzeichnung gewährleistet Integrität (Fill und Meier 2020, S. 1). Ist hierbei die empfohlene Lösung, da die Blockchain als einzige Technologie eine vollkommene Datenintegrität darstellen kann.
- Cloud: Speicherung und Übertragung in einer sicheren, verschlüsselten Umgebung schützt die Integrität (Xing, Qian und Zaman 2016, S. 197).
- SAP Add-On: Sichere und unveränderbare Aufzeichnung in geschützter Umgebung gewährleistet Integrität.

### 2. Datensicherheit

- Blockchain (SiGREEN): Kryptographische Mechanismen sichern Daten und kontrollieren den Zugriff (Fill und Meier 2020, S. 6 f.). Ist die empfohlene Lösung, da über die Hashwert-Verschlüsselung kein Rückschluss auf Originaldaten erfolgen kann. Zudem werden die Dokumente extern bei den jeweiligen Lieferanten gespeichert, sodass nur der Lieferant auf die Dokumente zugreifen kann.
- Cloud: Verschlüsselungs- und Zugriffskontrollmechanismen gewährleisten Datensicherheit (Xing, Qian und Zaman 2016, S. 196 f.).
- SAP Add-On: Verschlüsselte Datenübertragung und Zugriffskontrolle implementieren robuste Datensicherheit.

### 3. Skalierbarkeit und Flexibilität

- Blockchain (SiGREEN): Skalierbarkeit mit wachsenden Datenmengen und flexible Anpassung (Jaeger et al. 2022, S. 5 ff.).
- Cloud: Einfache Anpassung der Ressourcenkapazitäten für bedarfsgerechte Skalierung. Ist hierbei die empfohlene Lösung, da die Cloud sich am einfachsten auf weitere Datenfelder erweitern lässt. Zudem ist die Cloud einfach auf verschiedene Unternehmensanforderungen anpassbar.
- SAP Add-On: Anpassbare Module für flexible Erweiterungen und Anpassungen.

### 4. Kosten

- Blockchain (SiGREEN): Aktuelle Nutzung von SiGREEN ist kostenlos, Implementierungskosten können variieren. Ist hierbei die empfohlene Lösung, da sich die Anwendung im Grunde kostenlos verwenden lässt. Kosten entstehen erst bei Anpassungen, welche vom Unternehmen gefordert werden.
- Cloud: In der Regel kostengünstig, höhere Kosten bei individueller Anpassung.

- SAP Add-On: Kostenintensiv durch Erweiterung von SAP Standardmodulen.

### 5. Datenzugriff und -freigabe

- Blockchain (SiGREEN): Dezentrale Blockchain-Plattform ermöglicht sicheren Datenzugriff und -freigabe (Siemens AG 2023). Ist die empfohlene Lösung, da hierbei die Datenzugriff- und freigabe am besten geregelt werden kann.
- Cloud: Flexible, sichere Zugriffsmöglichkeiten, erfordert regelmäßige Aktualisierung der Zugriffsrechte (Xing, Qian und Zaman 2016, S. 202).
- SAP Add-On: Nutzung bestehender Datenzugriffs- und Freigaberechte.

### 6. Interoperabilität

- Blockchain (SiGREEN): Integration von Schnittstellen für nahtlose Kommunikation.
- Cloud: Nahtlose Integration und Datenaustausch mit unterschiedlichen Systemen (Xing, Qian und Zaman 2016, S. 199 f.).
- SAP Add-On: Nahtlose Integration in bestehende Systeme für effektiven Datenaustausch. Ist aus der Sicht von Unternehmen, welche bereits SAP verwenden die empfohlene Lösung. Da hier bereits SAP genutzt wird und die Interoperabilität und die erweiterte Nutzung sich hiermit am besten gestalten lässt.

### 7. Benutzerfreundlichkeit

- Blockchain (SiGREEN): Intuitive Benutzeroberfläche und Testmöglichkeit durch Demoversion.
- Cloud: Individuelle Anpassung der Benutzeroberfläche.
- SAP Add-On: Verbesserte Usability durch intuitive Benutzeroberfläche und nahtlose Integration. Ist aus der Sicht von Unternehmen, welche bereits SAP verwenden die empfohlene Lösung. Da hier bereits SAP genutzt wird und die Anwendung unternehmensweit bekannt ist und genutzt wird.

### 8. Reporting-Funktionalität

- Blockchain (SiGREEN): Unterstützung bei der Datenanalyse durch Filterfunktionen und vielfältige Auswertungstools (Siemens AG 2023). Ist hierbei die empfohlene Lösung, da mithilfe des Tools bereits gängige Reporting-Standards unterstützt werden können.
- Cloud: Flexible Berichterstellung, oft mit zusätzlicher Auswertungsanwendung.
- SAP Add-On: Umfassende Reporting-Funktionalitäten für detaillierte Analysen.

### 9. Ressourceneffizienz

- Blockchain (SiGREEN): Einsatz eines ressourcenschonenden PoS-Konsens-Algorithmus (Siemens AG 2023).

- Cloud: Effiziente Nutzung von skalierbaren, gemeinsam genutzten Ressourcen (Xing, Qian und Zaman 2016, S. 196 f.).
- SAP Add-On: SAP ist bereits ressourcen-effizient. Ist die empfohlene Lösung, da die Erweiterung um wenige Stammdatenfelder nur wenig Ressourcen erfordert.

#### 10. Anwendung von Umweltstandards

- Blockchain (SiGREEN): Nutzung gängiger Standards für PCF-Daten, externe Verifizierung möglich (Siemens AG 2023). Ist die empfohlene Lösung, da SiGREEN bereits mit den gültigen Standards arbeitet und die Verwendung dieser durch externe Zertifizierungsstellen unterstützt.
- Cloud: Einhaltung durch Lieferantenverpflichtung zu gängigen Standards im Upload.
- SAP Add-On: Einhaltung von Standards und Dokumentenhinterlegung.

Anforderung	Blockchain (SiGREEN)	SAP Add-On	Cloud
Datenintegrität	★★★	★★	★★
Daten-sicherheit	★★★	★★	★★
Skalierbarkeit und Flexibilität	★★	★★	★★★★
Kosten	★★★	★	★★
Datenzugriff- und Freigabe	★★★	★★	★★
Interoperabilität	★★	★★★★	★★
Benutzer-freundlichkeit	★★	★★★★	★★
Reporting Funktionalität	★★★	★★	★★
Ressourcen-ef-fizienz	★	★★★★	★★
Erfüllung von Umwelt-stand-dards	★★★	★★	★★
Ergebnis	25 Punkte	22 Punkte	21 Punkte

Tabelle 1 Gesamtergebnis Bewertung

Tabelle 1 fasst die Bewertung der drei Technologien hinsichtlich der Anforderungen zusammen. Bei einer Gleichgewichtung der Kriterien erweist sich die Blockchain als die vorteilhafteste Lösung. Allerdings bleibt anzumerken, dass der Abstand dieser Bewertung zu den anderen beiden Lösungen nicht sehr hoch ist. In der konkreten Anwendung ist sicher abzuwägen welchen Stellenwert die Kriterien im jeweiligen Anwendungsfall haben, um darauf basierend spezifisch zu entscheiden.

#### Fazit

In der vorliegenden Untersuchung wurden Nutzen und Anwendbarkeit der Blockchain-Technologie für das PCF-Datenmanagement entlang der Lieferkette analysiert und bewertet. Dazu wurde zunächst die PCF-Datenerfassung im Rahmen eines Green Supply Chain Managements dargestellt und dann die Anforderungen von Unternehmen an diese untersucht. Allein die Datenerfassung ist ein wichtiger Schritt in Richtung nachhaltiges Supply Chain Management. Unternehmen können Umweltauswirkungen quantifizieren und verstehen, was für gezielte Maßnahmen zur Emissionsreduktion und Ressourceneffizienz entscheidend ist. Die PCF-Datenerfassung ermöglicht nicht nur die Quantifizierung des eigenen CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks, sondern auch die Identifikation von Emissionen entlang der Lieferkette. Dies ermöglicht gezielte Optimierungen und Reduktionen, die Überwachung der Lieferantenleistung und die Förderung von Verbesserungen.

Auf Basis der konkreten, bereits implementierten Lösung SiGREEN konnte bestätigt werden, dass mit der Blockchain eine vielversprechende Technologie zur Verfügung steht, die die Anforderungen insbesondere im Hinblick auf Sicherheit, Transparenz und Dezentralisierung klar erfüllt.

Die Wahl der Technologie, ob Blockchain, SAP Add-On oder Cloud-Lösung, hängt aber letztendlich von den anwendungsspezifischen Bedarfen ab. Je nach Gewichtung dieser kann sich auch eine der beiden etablierten Lösungen, die ebenfalls eine ganze Reihe von Anforderungen an ein PCF-Datenmanagement erfüllen, als die vorteilhafteste erweisen. Nicht zuletzt sind an dieser Stelle auch die Vorbehalte, die hinsichtlich der vermuteten Komplexität und Schwierigkeiten der passenden Anwendung, die in der Praxis existieren, zu nennen.

Ein weiterer Aspekt, der eine gesonderte Betrachtung verlangt, sind die Umweltauswirkungen der Blockchain Technologie selbst. Insbesondere der Proof-of-Work (PoW) Konsensalgorithmus, bei dem der Konsens durch die Netzwerkteilnehmer hergestellt wird, die versuchen, einen Hashwert zu finden, der einer bestimmten Schwierigkeit genügt, erfordert viel Rechenkapazität. Dies geht mit einem erheblichen Energieverbrauch und entsprechenden Emissionen in Blockchain-Netzwerken einher (Hellwig 2021, S. 17; Sedlmeir et al. 2020, S. 599 ff; Vries 2018, S. 801).

Allein die Kryptowährung Bitcoin verursachte 0,59 Prozent des weltweiten Stromverbrauchs 2022 (Bocksch 2022). Die wichtigste Alternative, die deshalb für die Nutzung im Rahmen der PCF-Datenmanagement vorzuziehen ist und die auch das beispielhaft in dieser Untersuchung betrachtete Tool SiGREEN nutzt, ist der Proof-of-Stake (PoS) Algorithmus. Dieser zielt darauf ab, den Konsensalgorithmus von der Nutzung der Rechenkapazität zu entkoppeln, indem der Konsens wieder durch bestimmte Teilnehmer im Netzwerk hergestellt wird.

Bei der Kryptowährung Ethereum konnte mit der Umstellung von PoW auf PoS im September 2022 eine Reduktion des Energieverbrauchs um 99,9% erzielt werden (Crypto Carbon Ratings Institute 2022). Die Bewertung der Kategorie Ressourceneffizienz erfolgte entsprechend auch unter der Prämisse, dass die gewählte Blockchain-Lösung den PoS-Algorithmus nutzt.

Zusammenfassend unterstreichen die Ergebnisse die vielversprechende Zukunft der Blockchain-Technologie im PCF-Datenmanagement entlang der Lieferkette. Blockchain bietet Vorteile in Bezug auf Datensicherheit, Transparenz und Rückverfolgbarkeit. Die zukünftige Forschung sollte sich auf die praktische Umsetzung, Kosten-Nutzen-Analysen und branchenspezifische Standards konzentrieren.

### Literaturverzeichnis

- Bocksch, René. „Bitcoins Stromverbrauch übertrifft den der Ukraine.“, <https://de.statista.com/infografik/18608/stromverbrauch-ausgewaehlter-laender-im-vergleich-mit-dem-des-bitcoins/>.
- Browne, M., und J. Allen. *Applying life cycle assessment to investigate the balance of energy consumption between production and transport activities*. Cost 355 - WATCH workshop: changing behaviour towards a more sustainable transportsystem., 2004. <https://westminsterresearch.westminster.ac.uk/item/93143/applying-life-cycle-assessment-to-investigate-the-balance-of-energy-consumption-between-production-and-transport-activities>.
- Crippa, M., D. Guizzardi, E. Solazzo, M. Muntean, E. Schaaf, F. Monforti-Ferrario, M. Banja et al. „Verteilung der CO<sub>2</sub>-Emissionen weltweit nach Sektor 2022.“. Zuletzt geprüft am 29.03.2024, [https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report\\_2021](https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2021).
- Crypto Carbon Ratings Institute. „The Merge - Implications on the Electricity Consumption and Carbon Footprint of the Ethereum Network.“, <https://carbonratings.com/dl/eth-report-2022>.
- DFGE. „Aktualisierte TfS-Richtlinie und Einführung des PCF-Datenmodells: Förderung der Nachhaltigkeit in der chemischen Industrie.“, <https://dfge.de/tfs-richtlinie-pcf-datenmodell-chemische-industrie/>.
- Earley, Susan, und Deborah Henderson. „DAMA-DMBOK: data management body of knowledge.“ Basking Ridge, New Jersey: Technics Publications, 2017.
- European Commission. „A European Green Deal.“, letzte Aktualisierung 15.08.2023, [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_de](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de).
- Fill, Hans-Georg, und Andreas Meier. *Blockchain kompakt*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-27461-0>.
- GHG Protocol PAS 2050. „Quantifying the Greenhouse Gas Emissions of Products PAS 2050 & the GHG Protocol Product Standard.“, 2008. Zuletzt geprüft am 15.08.2023. [https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2022-12/GHG\\_Protocol\\_PAS\\_2050\\_Factsheet.pdf](https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2022-12/GHG_Protocol_PAS_2050_Factsheet.pdf).
- Global Carbon Project. „CO<sub>2</sub>-Emissionen weltweit in den Jahren 1960 bis 2022.“. Zuletzt geprüft am 29.03.2024, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/37187/umfrage/der-weltweite-co2-ausstoss-seit-1751/>.
- He, Bin, Yongjia Liu, Lingbin Zeng, Shuai Wang, Dong Zhang, und Qianyi Yu. „Product carbon footprint across sustainable supply chain.“ *Journal of Cleaner Production* 241 (2019): 118320. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118320>.
- Hellwig, Daniel. *BUILD YOUR OWN BLOCKCHAIN: Ein praktischer Leitfaden zur distributed-ledger-technologie*. [S.l.]: GABLER, 2021. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-62966-6>.
- Hottenroth, Heidi, Bettina Joa, und Mario Schmidt. *Carbon Footprints für Produkte: Handbuch für die betriebliche Praxis kleiner und mittlerer Unternehmen*. MV-Wissenschaft. Münster: Verl.-Haus Monsenstein und Vannerdat, 2014.
- Iansiti, Marco, und Karim R. Lakhani. „The Truth About Blockchain: It will take years to transform business, but the journey begins now.“ *Harvard Business Review*, 2017. Zuletzt geprüft am 06.08.2023. <https://hbr.org/2017/01/the-truth-about-blockchain>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Headline Statements from the Summary for Policymakers*. Cambridge University Press, 2023. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
- ISO. *Environmental management: Life cycle assessment*. 2. Aufl., 2022, 14044:2006; 14040:2006. <https://www.iso.org/standard/37456.html>.
- Jaeger, Florian A., Peter Saling, Nikolaj Otte, Rebecca Steidle, Jan Bollen, Birte Golembiewski, Ivana Dencic, Ulla Letinois, Torsten Rehl, und Johannes Wunderlich. „Challenges and requirements of exchanging Product Carbon Footprint information in the supply chain.“ *E3S Web of Conferences* 349 (2022): 7005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234907005>.
- Josh, Karliner, Slotterback Scott, Boyd Richard, Ashby Ben, und Steele Kristian. *Health Care's climate footprint: How the health sector contributes to the global climate crisis and opportunities for action.*, 2019.
- Lewandowski, Stefanie, André Ullrich, und Norbert Gronau. „Normen zur Berechnung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks.“ *Industrie 4.0 Management* 2021, Nr. 4 (2021): 17–20. Zuletzt geprüft am 15.08.2023. [https://doi.org/10.30844/I40M\\_21-4\\_S17-20](https://doi.org/10.30844/I40M_21-4_S17-20).
- Lindsey, Rebecca, und Dahmann Luann. „Climate Change: Global Temperature: Global Average Surface Temperature.“. Zuletzt geprüft am 29.03.2024, <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>.
- Ludwig, Jens, und Harry Enke. „Leitfaden zum Forschungsdaten-Management: Handreichungen aus dem WissGrid-Projekt.“ Glückstadt: VWH, Verlag

- Werner Hülsbusch, Fachverlag für Medientechnik und -wirtschaft., 2013.
- Rajeev, A., Rupesh K. Pati, Sidhartha S. Padhi, und Kannan Govindan. „Evolution of sustainability in supply chain management: A literature review.“ *Journal of Cleaner Production* 162 (2017): 299–314. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.026>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617309514>.
- Sedlmeir, Johannes, Hans Ulrich Buhl, Gilbert Fridgen, und Robert Keller. „The Energy Consumption of Blockchain Technology: Beyond Myth.“ *Business & Information Systems Engineering* 62, Nr. 6 (2020): 599–608. <https://doi.org/10.1007/s12599-020-00656-x>.
- Sen, Sevil, und John Andrew Clark. „A grammatical evolution approach to intrusion detection on mobile ad hoc networks.“ In *WiSec'09: Proceedings of the Second ACM Conference on Wireless Network Security; Zurich, Switzerland; March 16-18, 2009*. Hrsg. von David Basin, Srdjan Capkun und Wenke Lee, 95–102. New York, NY: ACM Press, 2009.
- Shakhbulatov, Denisolt, Arshit Arora, Ziqian Dong, und Roberto Rojas-Cessa. *Blockchain Implementation for Analysis of Carbon Footprint across Food Supply Chain.*, 2019.
- Siemens AG. „Dekarbonisierung beginnt mit Daten.“ Zuletzt geprüft am 24.08.2023, [https://www.siemens.com/de/de/unternehmen/nachhaltigkeit/product-carbon-footprint.html?acz=1&gclid=Cj0KCQjw3JanBhCPARI-sAJpXTx7R95JquufcZYVRNI-6xFsrw-V5DiyxCYahBMi0vTZFh4NrJyfvnw8aApS-fEALw\\_wcB](https://www.siemens.com/de/de/unternehmen/nachhaltigkeit/product-carbon-footprint.html?acz=1&gclid=Cj0KCQjw3JanBhCPARI-sAJpXTx7R95JquufcZYVRNI-6xFsrw-V5DiyxCYahBMi0vTZFh4NrJyfvnw8aApS-fEALw_wcB).
- Siemens AG. „Chemiebranche setzt bei Pilotprojekt zur Dekarbonisierung der Lief.“, letzte Aktualisierung 22.08.2023, <https://press.siemens.com/global/de/pressemitteilung/chemiebranche-setzt-bei-pilotprojekt-zur-dekarbonisierung-der-lieferkette-auf>.
- Smith, Carolyn L., Yvonne Zurynski, und Jeffrey Braithwaite. „We can't mitigate what we don't monitor: using informatics to measure and improve healthcare systems' climate impact and environmental footprint.“ *Journal of the American Medical Informatics Association JAMIA* 29, Nr. 12 (2022): 2168–73. <https://doi.org/10.1093/jamia/ocac113>.
- Srivastava, Samir K. „Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review.“ *International Journal of Management Reviews* 9, Nr. 1 (2007): 53–80. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2370.2007.00202.x>.
- TFS Initiative. „Home - TFS Initiative.“, [https://www.tfs-initiative.com/app/uploads/2024/03/TfS\\_PCF\\_guidelines\\_2024\\_EN\\_pages-low.pdf](https://www.tfs-initiative.com/app/uploads/2024/03/TfS_PCF_guidelines_2024_EN_pages-low.pdf)
- Umweltbundesamt. „Ökobilanz: Internationale Initiativen zur Anwendung von Ökobilanzen.“, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/oekobilanz>.
- Villena, Verónica H., und Dennis A. Gioia. „A More Sustainable Supply Chain.“, letzte Aktualisierung 16.11.2020, <https://hbr.org/2020/03/a-more-sustainable-supply-chain>.
- Vries, Alex de. „Bitcoin's Growing Energy Problem.“ *Joule* 2, Nr. 5 (2018): 801–5. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.04.016>.
- Wamba, Samuel Fosso, und Maciel M. Queiroz. „Blockchain in the operations and supply chain management: Benefits, challenges and future research opportunities.“ *International Journal of Information Management* 52 (2020): 102064. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.102064>.
- Windkraft Journal. „SiGreen: Siemens entwickelt ökosystembasierten Ansatz für den Austausch von Emissionsdaten.“ *Windkraft-Journal*, 22.11.2021. Zuletzt geprüft am 24.08.2023. <https://www.windkraft-journal.de/2021/11/22/sigreen-siemens-entwickelt-oeko-systembasierten-ansatz-fuer-den-austausch-von-emissionsdaten/169315>.
- World Resources Inst. *The greenhouse gas protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard*. Revised ed. Washington, DC: World Resources Inst, 2004.
- Xing, Ke, Wei Qian, und Atiq Uz Zaman. „Development of a cloud-based platform for footprint assessment in green supply chain management.“ *Journal of Cleaner Production* 139 (2016): 191–203. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616311672>.