

Ansätze für Carbon Monitoring und Carbon Costs Controlling bei komplexen Prozesstechniken als Element der Investitionsplanung für die Dekarbonisierung – Konzeptstudie

Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz,
unter dem Förderkennzeichen: UM21DC002

Impressum

Ansätze für Carbon Monitoring und Carbon Costs Controlling

Projektleitung

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
Prof. Dr. Clemens Rohde, clemens.rohde@isi.fraunhofer.de

Verantwortlich für den Inhalt des Textes

Georg Ratjen, g.ratjen@oekotec.de; Sonja Arnold-Keifer, sonja.arnold-keifer@isi.fraunhofer.de;
Dr. Simon Hirzel, simon.hirzel@isi.fraunhofer.de; Knut Grabowski, k.grabowski@oekotec.de;
Dr. Nathanael Harfst mail@nathanaelharfst.de; Dr. Tatjana Ruhl, tatjana.ruhl@deneff.org;
Prof. Dr. Clemens Rohde, clemens.rohde@isi.fraunhofer.de

Beteiligte Institute

ÖKOTEC Energiemanagement GmbH

Torgauer Straße 12-15, 10829 Berlin
Dr. Christoph Zschocke, c.zschocke@oekotec.de

Deutsche Unternehmensinitiative Energieeffizienz e.V. (DENEFF)

Kirchstraße 21, 10557 Berlin-Tiergarten
Martin Bornholdt, martin.bornholdt@deneff.org

Gefördert durch das

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)

Förderkennzeichen: UM21DC002

Zitierempfehlung

Ratjen, Georg; Arnold-Keifer, Sonja; Hirzel, Simon; Grabowski, Knut; Harfst, Nathanael; Ruhl, Tatjana; Rohde, Clemens: Carbon Monitoring und Carbon Costs Controlling. Karlsruhe, Berlin: Fraunhofer ISI, ÖKOTEC Energiemanagement GmbH, Dr. Nathanael Harfst Energiemanagement und Controlling, DENEFF.

Erstellung

Dezember 2022

Hinweise

Dieser Bericht einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Die Informationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen unter Beachtung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis zusammengestellt. Die Autorinnen und Autoren gehen davon aus, dass die Angaben in diesem Bericht korrekt, vollständig und aktuell sind, übernehmen jedoch für etwaige Fehler, ausdrücklich oder implizit, keine Gewähr. Die Darstellungen in diesem Dokument spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung des Auftraggebers wider.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Zusammenfassung | 6 |
| 1 Einleitung | 7 |
| 1.1 Hintergrund | 7 |
| 1.2 Zielsetzung | 8 |
| 1.3 Vorgehensweise | 9 |
| 2 Begriffsdefinitionen | 11 |
| 3 Arbeitspaket 1: Stand der Technik und Wissenschaft bei Carbon Monitoring | 13 |
| 3.1 Zielsetzung und Vorgehen | 13 |
| 3.2 Branchenübergreifende Methoden des Carbon Monitorings | 13 |
| 3.2.1 Abgrenzungen | 13 |
| 3.2.2 Prinzipielle Vorgehensweisen | 15 |
| 3.2.3 Ökobilanzierung | 17 |
| 3.2.4 Greenhouse Gas Protocol | 17 |
| 3.2.5 Input-Output-Analyse | 17 |
| 3.2.6 Spezielle Vorgehensweisen | 18 |
| 3.3 Branchenspezifische Konkretisierungen | 19 |
| 3.3.1 Übersicht | 19 |
| 3.3.2 Beispiel Zementherstellung | 20 |
| 3.3.3 Beispiel Aluminiumherstellung | 21 |
| 3.4 Zusammenfassung der Erkenntnisse und Schlussfolgerungen für die weiteren Arbeiten 21 | |
| 4 Arbeitspaket 2: Nachweis der Übertragbarkeit der Kennzahlenmethodik auf Carbon Monitoring | 22 |
| 4.1 Nachweis der Übertragbarkeit der Kennzahlenmethodik im Rahmen eines Kurzleitfadens: Product Carbon Footprints und Product Carbon Costs | 22 |
| 4.1.1 Hintergrund, Zielsetzung und Vorgehen | 22 |
| 4.1.2 Product Carbon Footprints (PCFs) und Costs (PCCs) | 23 |
| 4.1.3 Produktionsprozesse als Systeme mit Nutzen und Aufwänden | 24 |
| 4.1.4 Erfassung von Product Carbon Footprints (PCFs) und Costs (PCCs) | 25 |
| 4.1.5 Monitoring von PCFs und PCCs: Vergleich mit der Baseline | 30 |
| 4.1.6 Benchmarking von PCFs und PCCs: Vergleich mehrerer Systeme | 33 |
| 4.1.7 Annex I: Modellierung für das Monitoring | 34 |
| 4.1.8 Annex II: Modellierung für das Benchmarking | 36 |
| 4.1.9 Annex III: Umgang mit Systemen mit mehreren Nutzen | 38 |

| | | |
|--------|---|-----------|
| 4.1.10 | Annex IV: Kalkulatorische Kosten für CO ₂ : Dekarbonisierung in der Kosten- und Leistungsrechnung verankern..... | 40 |
| 4.1.11 | Erkenntnisse..... | 42 |
| 4.2 | Überblicksdokument zu den Herausforderungen bei der Modellierung komplexer Prozesse | 43 |
| 4.2.1 | Kennzahlenkataloge für verbreitete Prozesse..... | 43 |
| 4.2.2 | Effizienz innerhalb eines Batches bestimmen..... | 43 |
| 4.2.3 | Physikalisch motivierte Einflussgrößen | 43 |
| 4.2.4 | Vernetzte Prozesse für ganzheitliche Effizienzoptimierung | 44 |
| 4.2.5 | Effizienz zwischen Batches vergleichen..... | 44 |
| 4.2.6 | Effizienzcontrolling im betriebswirtschaftlichen Controlling verankern | 44 |
| 4.3 | Steuerung von Carbon Costs & Emissionen in bestehenden Controlling- und Kostenrechnungssystemen | 45 |
| 4.3.1 | Hintergrund, Zielsetzung und Vorgehen | 45 |
| 4.3.2 | Hintergrund: Steuerung von Carbon Costs & Emissionen in bestehenden Controlling- und Kostenrechnungssystemen | 45 |
| 4.3.3 | Schaffung struktureller Voraussetzungen zur Integration von CO _{2e} -Emissionen in die Kostenrechnung..... | 47 |
| 4.3.4 | Beispielhafte Darstellung von Verrechnungsmöglichkeiten auf Kostenstellen und der Produktkalkulation | 52 |
| 5 | Arbeitspaket 3: Eingrenzung ausgewählter Prozesstechniken zur Demonstration..... | 57 |
| 5.1 | Hintergrund, Zielsetzung und Vorgehen | 57 |
| 5.2 | Relevanz der Wirtschaftszweige für die Dekarbonisierung..... | 58 |
| 5.3 | Auswahl Prozesstechniken..... | 61 |
| 6 | Arbeitspaket 4: Rückkopplung mit Unternehmen und Gewinnung von Demonstrationspartnern..... | 63 |
| 6.1 | Hintergrund, Zielsetzung und Vorgehen | 63 |
| 6.2 | Adjustierung und Anschreiben an die Unternehmen. | 63 |
| 6.1 | Präsentation des Vorhabens und Teilnahmeerklärungen..... | 65 |
| 6.2 | Ergebnisse der Workshops | 66 |
| 6.3 | Erkenntnisse..... | 66 |
| 7 | Arbeitspaket 5: Erstellung von Wegweisern für Carbon Monitoring der Dekarbonisierungsprojekte..... | 67 |
| 7.1 | Hintergrund, Zielsetzung und Vorgehen | 67 |
| 7.2 | Aufbau der Wegweiser zum Carbon Monitoring..... | 67 |
| 7.3 | Erkenntnisse..... | 68 |
| 8 | Abschlussveranstaltung Carbon Monitoring | 69 |
| 9 | Aktualisierung der Leitfäden aus dem Vorgängervorhaben EnPI-Connect..... | 70 |

| | | |
|----|-----------------------------|----|
| 10 | Fazit | 71 |
| 11 | Handlungsempfehlungen | 72 |
| 12 | Abbildungsverzeichnis..... | 73 |
| 13 | Tabellenverzeichnis | 75 |
| | Literaturverzeichnis | 76 |

Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund einer nachhaltigen Umsetzung und zuverlässigen Erfolgskontrolle von Dekarbonisierungsmaßnahmen hat die vorliegende Ausarbeitung zum Ziel, zu prüfen und im Erfolgsfall zu demonstrieren, wie die Methodik für Energiekennzahlen aus dem Vorgängerprojekt EnPI-Connect auf eine Methodik für Carbon Monitoring und Carbon Cost Controlling von Dekarbonisierungsmaßnahmen übertragen werden kann. Die positive Resonanz im Energiemanagement und die technologieübergreifende Ausgestaltung der bestehenden Kennzahlenmethodik waren Anlass, die Kurzleitfäden aus dem EnPI-Connect Projekt auf nicht-energetische Aufwände zu übertragen und die Ermittlung von CO₂-Einsparungen, das Monitoring und auch Benchmarking zu unterstützen.

Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass bestehende Normen und Studien zwar die Ermittlung von Product Carbon Footprints betrachten, jedoch nicht auf den Vergleich zwischen dekarbonisierten Soll-Zuständen und Referenz-Zuständen fokussieren. Insbesondere die Anforderung an die Kompatibilität der Systemgrenzen zwischen Soll- und Referenzzustand wird dort nicht näher ausgeführt. Darüber hinaus liefern sie u. a. keine Anleitungen zur Überwachung von Effizienz und CO₂-Emissionen in Echtzeit. Eine effiziente Verwendung erneuerbarer Energien ist bei dekarbonisierten Techniken aber geboten. Diese nutzen zwar erneuerbare Energien, sind jedoch in ihrer Kapazität begrenzt.

Vor diesem Hintergrund wurde ein neuer Kurzleitfaden „Product Carbon Footprints und Product Carbon Costs - Überblick: Erfassung, Monitoring und Benchmarking von CO_{2e}-Emissionen und CO_{2e}-Kosten auf Produktebene“ bereitgestellt, der diese Lücken abdeckt. Er gibt konkrete und kompakte Anleitungen auf Basis von Fallbeispielen. Seine Struktur entspricht den Dokumenten aus dem methodischen Überblick zur Kennzahlenmethodik aus dem EnPI-Connect Vorhaben. Der neu entstandene Leitfaden wurde auf Dekarbonisierungsprojekte in ausgewählten energieintensiven Industrien angewendet. Zu diesem Zweck wurden zunächst in drei Unternehmen Workshops durchgeführt und die Ergebnisse zu Wegweisern verarbeitet. Diese sind einheitlich strukturiert und zeigen die technologieübergreifende Anwendbarkeit der Carbon Monitoring Methodik.

- Wegweiser 1: Zementindustrie: Abscheidung unvermeidbarer CO₂-Emissionen und Substitutionswirkung in den Verwertungspfaden
- Wegweiser 2: Stahlindustrie: Umstellung von Hochofenroute auf Direktreduktion (DRI) mit H₂
- Wegweiser 3: Chemieindustrie: Minimierung der Glykolsäureverluste in der Elektrodialyse durch modellbasierte Effizienzoptimierung

Die im Leitfaden „Product Carbon Footprints und Product Carbon Costs - Überblick: Erfassung, Monitoring und Benchmarking von CO_{2e}-Emissionen und CO_{2e}-Kosten auf Produktebene“ beschriebene Carbon Monitoring Methodik und Carbon Costs Controlling erscheint daher als geeignete einheitliche Methodik zur Auswertung von CO₂-Einsparungen in Dekarbonisierungsvorhaben. Er bietet bei einer Verankerung in Förderrichtlinien die Chance, die Reduktion von CO₂-Emissionen in Dekarbonisierungsvorhaben nach einheitlichen Vorgehensweisen auszuwerten und konsolidiert zu berichten. Schnittmengen ergeben sich durch die Betrachtung von kalkulatorischen Kosten für CO₂ auch für die Vereinbarung von CO₂-Preisen in Klimaschutzverträgen. Ferner wurde ein Leitfaden „Steuerung von Carbon-Costs in bestehenden Controlling- und Kostenrechnungs-Systemen“ angefertigt, der sich speziell an das betriebswirtschaftliche Controlling richtet und die Kompatibilität mit Kostenstellenstrukturen in den Fokus rückt. Im Sinne eines ersten Transfers der Ergebnisse wurde eine Abschlussveranstaltung zum Vorhaben im Rahmen der DENEFF AG Industrie durchgeführt.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Die Aussicht auf eine nachhaltige Umsetzung und eine technisch wie finanziell zuverlässige **Erfolgskontrolle von Dekarbonisierungsmaßnahmen** ist eine wichtige Voraussetzung für die Investitionsbereitschaft von Unternehmen und ihren Stakeholdern in entsprechende Maßnahmen. Viele Unternehmen stoßen bei der Konzeption der Erfolgskontrolle und der dafür notwendigen Prozessüberwachung (nötig für optimierte Anlagenfahrweisen) an ihre Grenzen.

Einschlägige Standards wie die Reihe der ISO 14064 und ISO 14067-Normen zur Bestimmung und Berichterstattung über Treibhausgasemissionen oder das internationale GHG Protocol bieten Methoden für eine zeitraumbezogene CO₂-Bilanzierung und eine periodenbezogene Berichterstattung an. Jedoch beschreiben sie kein Vorgehen für eine aussagekräftige zeitpunktbezogene Nachverfolgung der Einsparung an Kohlendioxidemissionen. Ferner betrachten sie keine fortlaufende Effizienzkontrolle auf der Ebene von Prozessen. Ebenso sind sie als normative Texte nur eingeschränkt als kompakte Handlungsanweisungen nutzbar. Die Normenreihe ISO 50001 zu Energiemanagementsystemen und die EMAS-Systematik (Eco-Management and Audit Scheme) bieten zur energetischen Bewertung und zur dafür notwendigen Referenz- bzw. Baseline-Erstellung bereits allgemeine methodische Lösungsansätze. Diese bedürfen jedoch in der praktischen Anwendung gerade mit Blick auf **komplexe Prozesstechniken** systematischere und detailliertere Handlungsanweisungen im Stil von kompakten Leitfäden. Entsprechende energiebezogene Ansätze wurden bereits mit der Kennzahlmethodik des BMU eingeführt und im Vorhaben EnPI-Connect erfolgreich in Industrie und Gewerbe erprobt.

Konkrete Handlungsanweisungen, die technologieübergreifend unabhängig vom jeweiligen Dekarbonisierungsprojekt angewendet werden können, sind auch für die methodisch einheitliche Ermittlung von CO₂-Einsparungen elementar. Die CO₂-Emissionen können prozess- und energiebedingter Natur sein. Bei der Auswertung ist unabhängig von der Art der Dekarbonisierungsmaßnahme ein ganzheitlicher Systemvergleich, der den dekarbonisierten Soll-Zustand mit einem Referenz-Zustand in kompatiblen Systemgrenzen gegenüberstellt, eine wichtige Voraussetzung. Geeignete Systemgrenzen zu definieren, ist insbesondere für Dekarbonisierungsvorhaben eine Herausforderung, deren Wirkung sich nicht nur am Standort der Anlage, sondern in den Verwertungspfaden entfaltet.

Dekarbonisierungsmaßnahmen bringen zudem häufig gesteigerte Energieaufwände mit sich. Diese speisen sich zwar aus erneuerbaren Quellen, jedoch sind die Verfügbarkeiten erneuerbarer Energien in ihrer Kapazität begrenzt. Schon bei der Auslegung gilt es, Effizienzziele mit Lieferanten zu vereinbaren und Messsysteme für ein Effizienzcontrolling vorzusehen. Dieses ermöglicht neben der Erfolgskontrolle der Effizienzziele eine dauerhafte Effizienzerhaltung, Predictive Maintenance, Frühwarnsysteme und automatisierte Effizienzoptimierung. Verlässliches Effizienzcontrolling muss variable Produktionsbedingungen berücksichtigen.

Neben der technischen Analyse spielt für die Umsetzung von Dekarbonisierungsmaßnahmen die wirtschaftliche Bewertung eine entscheidende Rolle. Eine wichtige Voraussetzung dafür besteht in der verursachungsgerechten Zuordnung der Kosten für Energie und CO₂-Emissionen auf Kostenträger. In der Regel weisen Controllingabteilungen die Kosten für Energie und CO₂-Emissionen als Gemeinkosten über starre Verrechnungsschlüssel zu. Das kann dazu führen, dass die tatsächlich verursachten Kosten für Energie und CO₂-Emissionen dem Prozess, der sie verursacht, gar nicht zugerechnet werden. Diese Umstände erschweren die Einbeziehung des betriebswirtschaftlichen Controllings in die Kontrolle der Dekarbonisierungswirkungen.

1.2 Zielsetzung

Vor diesem Hintergrund besteht das Ziel der vorliegenden Vorstudie darin zu prüfen **und im Erfolgsfall zu demonstrieren**, wie die Methodik für Energiekennzahlen aus dem Vorgängerprojekt EnPI-Connect auf eine Methodik **für Carbon Monitoring und Carbon Cost Controlling von Dekarbonisierungsmaßnahmen übertragen werden kann. Die bereits entwickelten und bewährten Vorgehensweisen aus den Vorgängerprojekten sollen auf den Untersuchungsgegenstand prozessbedingte CO₂e-Emissionen angewendet werden.** Durch diese Vorstudie soll anhand realer Dekarbonisierungsvorhaben der energieintensiven Industrie geklärt werden, ob die Ermittlung der CO₂-Vermeidung auf Basis der Kennzahlenmethodik praktikabel vereinheitlicht werden kann. Praktikabilität bedeutet an dieser Stelle auch Einfachheit bei gleichzeitiger logischer Stringenz und Vollständigkeit. Perspektivisch könnte ein entsprechender Ansatz als Grundlage für eine Auswertung von CO₂-Einsparungen auch bei öffentlichen Förderungen genutzt werden. In diesem Fall könnten CO₂-Einsparungen geförderter Projekte einheitlich ermittelt und konsolidiert berichtet werden.

Das angestrebte **Carbon Monitoring** soll insbesondere folgende Merkmale erfüllen:

- **Verursachungsorientierung:** CO₂-Emissionen aus der Produktion von Vorprodukten werden dabei verursachungsgerecht umgelegt. Bei Produkten mit inhärentem CO₂ werden auch die Produktverwendungen einbezogen
- **Konsistenz in den Systemgrenzen:** Die im Zuge von Dekarbonisierungsmaßnahmen angestrebten Soll-Zustände sollen konsistente Systemgrenzen zu den Referenz-Zuständen aufweisen, damit eine Vergleichbarkeit gegeben ist und eine Berechnung der CO₂-Einsparungen im Vergleich zum substituierten System erfolgen kann.
- **Erfolgsorientierung:** Dekarbonisierte Techniken bringen häufig einen hohen Energieverbrauch mit sich. Da Erneuerbare Energien aber nur in begrenzter Kapazität gleichzeitig zur Verfügung stehen, ist eine effiziente Verwendung von hoher Bedeutung. Mit Blick auf die effiziente Auslegung der dekarbonisierten Technik durch Anlagenlieferanten gilt es dynamische Effizienzziele im Engineering zu definieren, die auch Änderungen bei Produktionsbedingungen abbilden können. Um den Erfolg der Zielerreichung prüfen zu können gilt es, die Abhängigkeiten der Aufwände vom Nutzen (Produktionsmengen) und von externen Einflussgrößen (z. B. variierende Produkt- oder Rohstoffeigenschaften, Witterungsbedingungen) als mathematische Funktion abzubilden und von vornherein die nötige Messtechnik vorzusehen. Im Anschluss an die Erfolgsprüfung der effizienten Auslegung können diese Modelle für eine kontinuierliche Effizienzüberwachung (Frühwarnsysteme, Predictive Maintenance) sowie zur fortlaufenden Effizienzoptimierung genutzt werden.
- **Echtzeitorientierung:** Das Verfahren ist darauf ausgerichtet, kontinuierlich zeitpunktbezogene Werte zu CO₂-Emissionen für kontinuierliche Prozesse und diskontinuierliche Batchprozesse auszuweisen und mit in Echtzeit modellierten Vergleichswerten (Baseline) gegenüberzustellen. Dieser Aspekt spiegelt sich bereits teilweise in der vorgenannten Erfolgsorientierung wieder.
- **Kontinuität:** Transparente Führung eines Erfolgsnachweises auch über die Dauerhaftigkeit der umgesetzten Maßnahmen hinaus im Betrieb der dekarbonisierten Technik

Das **Carbon Cost Controlling** soll das Augenmerk insb. auf folgende Anforderungen legen:

- **Verursachungsorientierung:** Realistische und verursachungsgerechte Ermittlung der Kosten emissionsintensiver Produkte.
- **Maßnahmenorientierung:** Unterstützung der Investitionsplanung für Dekarbonisierungsmaßnahmen durch Ausweisung der Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahmen.

- **Kompatibilität mit den Kostenstellenstrukturen:** Überbrückung der Unterschiede in den Systemgrenzen, die im betriebswirtschaftlichen Controlling angelegt werden, zu den Systemgrenzen im technischen Controlling. Dies unterstützt eine Steuerung von Maßnahmen.

Die Zielgruppe der Carbon Monitoring Methodik sind **Unternehmen in Industrie und Gewerbe** sowie Fördermittelgeber. Dabei wird auch eine Anwendbarkeit des Ansatzes auf Unternehmen des Mittelstands angestrebt. Um die Anwendbarkeit und den Mehrwert der Methodik in der Praxis sicher zu stellen, sollen eine aktive **Einbindung von Unternehmen** in das Vorhaben über Workshops und durch die Erstellung von Einführungsplänen für die Anwendung der Methodik in ausgewählten Unternehmen sichergestellt werden.

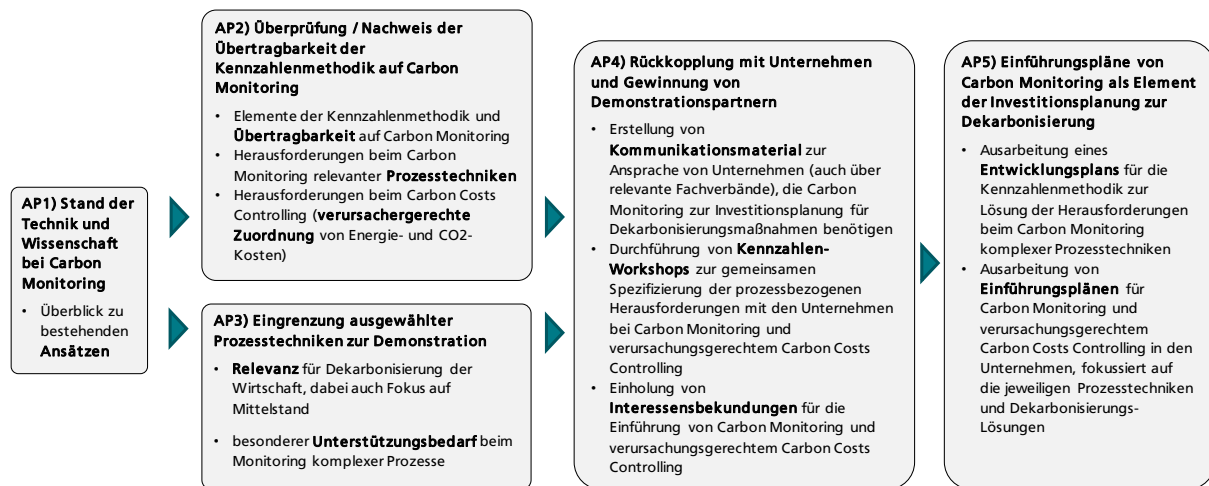
1.3 Vorgehensweise

Um die genannten Ziele zu erreichen, wird folgendes Vorgehen eingeschlagen (Abbildung 1):

- **Arbeitspaket 1:** Zunächst wird in Arbeitspaket 1 ein **Überblick über den Stand der Wissenschaft** zum Monitoring von CO₂-Einsparungen bei komplexen Prozesstechniken gegeben.
- **Arbeitspaket 2:** Im Anschluss wird die **Übertragbarkeit der bestehenden Methodik für Energieeffizienzkennzahlen** auf diese Problemstellung hin geprüft und im Erfolgsfall eine Übertragung durchgeführt. Ein besonderer Fokus liegt darauf, über die Erfassung der energiebezogenen Aspekte hinaus auch prozessbedingte CO₂-Emissionen abzudecken. Darüber hinaus werden Herausforderungen und Ansätze für eine verursachungsgerechte Zuordnung von Energie- und CO₂-Kosten auf Produkte beschrieben. Ein ergänzender Leitfaden soll darüber hinaus auf Carbon Monitoring in den Kostenstellen eingehen.
- **Arbeitspaket 3:** Danach erfolgt eine Eingrenzung von, für die Dekarbonisierung in Deutschland, **besonders relevanten, komplexen Prozesstechniken**, die sich für eine nähere Betrachtung in der Praxis eignen. Ein zentrales Kriterium ist hierbei auch die Übertragbarkeit.
- **Arbeitspaket 4:** Auf Grundlage der Ergebnisse werden Kommunikationsmaterialien zur **Ansprache von Unternehmen** entwickelt, die diese Prozesstechniken einsetzen können. In Workshops vor Ort bei drei interessierten Unternehmen (alternativ: Webinare) aus den in Arbeitspaket 3 ermittelten Branchen werden die Herausforderungen und Ansätze für Carbon Monitoring für ihre Dekarbonisierungsprojekte präzisiert.
- **Arbeitspaket 5:** Auf dieser Grundlage werden **Wegweiser für die Unternehmen** entwickelt. Die Wegweiser sollen der einheitlichen, technologieübergreifenden Kennzahlenmethodik im Carbon Monitoring folgen und diese auf die individuellen Dekarbonisierungsmaßnahmen anwenden. Im Fokus steht die Ermittlung von CO₂-Einsparungen sowie die Skizzierung von Voraussetzungen für eine fortlaufende Effizienzoptimierung der dekarbonisierten Techniken und Zielwerte für die Anlagenlieferanten.

Abbildung 1: Übersicht der Arbeitspakete

Untergliederung des Vorhabens in 5 Arbeitspakete



Quelle: Eigene Darstellung

2 Begriffsdefinitionen

Ausgangsbasis (Baseline): Die Ausgangsbasis oder Baseline stellt bei der Bewertung einer Methode den Referenzpunkt als Basis für einen Vergleich dar. Die Bildung der Baseline erfolgt auf Basis anerkannter Analysen (z. B: Regressionsanalysen).

Batch-Prozesse: Batch-Prozesse sind diskontinuierliche Prozesse, bei denen Produkte in Chargen gefertigt werden und die damit im Gegensatz zu kontinuierlichen Prozessen Unterbrechungen unterliegen. Unter diesen Gegebenheiten stellt die zeitliche Zuordnung von Aufwänden, Nutzen und externen Einflussgrößen zueinander eine deutlich komplexere Problemstellung dar.

Benchmarking: Bei einem Benchmarking werden gesammelte, ausgewertete und zugeordnete leistungsbezogene Daten mit denen einer Benchmark verglichen. Als Benchmark wird z.B. der effizienteste vorhandene Prozess/Technologie verwendet.

CO₂-Bilanzierung: Die "Abrechnung" der CO₂-Emissionen am Ende eines bestimmten Zeitraumes, bspw. eines Jahres. Diese Bilanzierung ist an das betriebliche Rechnungswesen angelehnt. Eine Voraussetzung dieses Verfahren ist das Festlegen einer Bilanzgrenze.

Product Carbon Costs: Das Controlling ist eine Führungs- und Managementfunktion (Weber & Schäffer, 2011) und beinhaltet die Steuerung von Ressourcen (Horváth, Gleich, & Seiter, 2015). Beim Carbon Cost Controlling werden die Kosten für CO₂-Emissionen möglichst verursachergerecht auf Kostenträger zugeordnet. Das Carbon Cost Controlling dient damit einer unternehmensinternen Kostensteuerung und Produktkalkulation, um die steigende Bedeutung von Kosten für CO₂-Emissionen zu berücksichtigen. Kalkulatorische Kosten können Bestandteile der Product Carbon Costs sein.

Carbon Monitoring: Das Monitoring im Allgemeinen beinhaltet eine kontinuierliche, systematische Überwachung und Erfassung eines Vorganges, bspw. durch Messungen und Protokollierungen. Das Carbon Monitoring befasst sich mit der Überwachung von CO₂-Emissionen eines Systems im Vergleich zur Baseline. Die Baseline kennzeichnet, welche CO₂-Emissionen bei der Fertigung eines vergleichbaren Gutes aufgetreten wären, wenn das System so beschaffen wäre wie im Referenzzustand.

Energiebedingte CO_{2e}-Emissionen: Energiebedingte Emissionen sind auf die Bereitstellung bzw. Umwandlung von Energie zurückzuführen und müssen zunächst in CO₂-Äquivalente umgerechnet werden.

Externe Einflussgrößen: Die CO₂-Emissionen eines Systems können neben dem Nutzen (z. B: Produktionsmenge) signifikant von weiteren externen Einflussgrößen abhängen, wie Witterung und Außentemperatur. Je nach Zielstellung des Carbon Monitoring kann eine Einbeziehung und Bereinigung wichtig sein.

Komplexe Prozesstechniken: In der Prozesstechnik wird zwischen kontinuierlichen und diskontinuierlichen Prozessen unterschieden. Die Batch-Prozesse gehören zu der Kategorie der komplexen Prozesstechnik. Energetische Prozesse weisen sehr häufig komplexe Abhängigkeiten zwischen den stofflich und energetisch bedingten CO₂-Emissionen und externen Einflussgrößen auf. Hierbei sind beispielsweise Produktmengen verschiedener Produkttypen, Batch-Prozesse, Änderungen des Produkttyps und Witterungseinflüsse adäquat zu berücksichtigen. Aufgrund der Komplexität und der methodischen Herausforderungen dieser Aufgabe wird eine Bereinigung dieser Einflussgrößen in der Regel auch in der CO₂-intensiven Industrie nur selten oder nur in Sonderfällen durchgeführt.

Prozessbedingte CO₂-Emissionen: Bei prozessbedingten Emissionen kann meistens ein genauer Treibhausgas-Ausstoß (CO₂-Emissionen bzw. CO₂-Äquivalente) auf Basis von Stoffmengen beziffert werden.

Exkurs Wasserstoff: Bei der Produktion von Wasserstoff hat sich eine andere Art der Sichtbarmachung von CO₂-Emissionen durchgesetzt. Hierbei wird eine "Farbenlehre" (Tabelle 1) verwendet (Umweltbundesamt, 2021), (European Parliament, 2021), (Sachverständigenrat für Umweltfragen, 2021), (IKEM, 2020).

Tabelle 1: Exkurs: Wasserstoff "Farbenlehre"

| "Farbe" | Herstellung | CO ₂ -Emissionen | Kostenbereich | Sonstiges |
|---------------|--|---|--------------------------|---|
| grün | Elektrolyse aus Wasser mit Strom aus erneuerbaren Energien | keine | 2,5 - 5,5 €/kg | Abwärme theoretisch in Wärmenetze einspeisbar |
| gelb | Elektrolyse mit Strommix | 420-780 g/kWh H ₂ (je nach Strommix) | abh. von Strompreis | |
| türkis | Methanpyrolyse (thermische Spaltung) von Erdgas | Kein gasförmiges CO ₂ , sondern fester Kohlenstoff | 0,9 €/kWh H ₂ | Noch viel Forschungsbedarf (auch bzgl. Umweltherausforderungen und -risiken) noch nicht bekannt |
| weiß | Nebenprodukt in chemischen Prozessen (bspw. Chloralkali-Elektrolyse) bzw. natürliche Vorkommen | Abh. von Prozess | abh. von Prozess | Stark abhängig von Verfahren |
| blau | Vgl. grauer Wasserstoff; jedoch wird anfallendes CO ₂ mit CCS (Carbon Capture and Storage) unterirdisch gespeichert | weiterhin Emissionen für Erdgas-Transport; Speicherkapazitäten nach derzeitigem Stand nicht dauerhaft möglich, 30-120 g CO ₂ /kWh H ₂ | 2 €/kg | Abscheidung CO ₂ aus Erdgas-Reforming nicht 100 % möglich; |
| grau | Dampfreformierung aus fossilen Kohlenwasserstoffen (Erdgas) | ~ 9,3 kg CO ₂ /kg bzw. 300 g CO ₂ /kWh H ₂ | 1,5 €/kg | - |
| braun | Gasifizierung aus Braunkohle | | | |
| schwarz | Gasifizierung aus Steinkohle | 570 g CO ₂ /kWh H ₂ (Emissionen aus Vorkette und Transport nicht enthalten) | | |
| pink oder rot | Herstellung aus Kernenergie | - | | Problematische Herstellung |

3 **Arbeitspaket 1: Stand der Technik und Wissenschaft bei Carbon Monitoring**

Autoren: Arnold-Keifer, Sonja; Dr. Hirzel, Simon; Prof. Dr. Rohde, Clemens

3.1 **Zielsetzung und Vorgehen**

Dieses einleitende Arbeitspaket 1 zielt darauf ab, einen orientierenden Überblick über den Stand der Wissenschaft beim Monitoring komplexer Prozesstechniken zu geben. Hierbei wird der Bezug zum jeweiligen Anwendungsbereich sowie zu den Merkmalen der angestrebten Methodik hergestellt. Um eine praktikable Einordnung zu erhalten, umfasst die Darstellung sowohl relevante Konzepte als auch Anwendungen.

Bei den bestehenden Methoden wird untersucht, inwieweit mit diesen Dekarbonisierungs-Maßnahmen Prozesse einzelner Unternehmen aussagekräftig und transparent validiert und bewertet werden können. Zusätzlich sollten erforderliche Nachbesserungen erkannt und die Energie- und CO₂-Kosten verursachungsgerecht zugewiesen werden können.

Um eine praktikable Einordnung über den Stand der Wissenschaft beim Monitoring komplexer Prozesstechnik zu erhalten, wird eine Recherche nach relevanten Konzepten und Anwendungen durchgeführt. Für die Recherche wurde einerseits auf wissenschaftliche Fachportale, beispielsweise Scopus, zurückgegriffen. Andererseits wurden auch Websuchen ausgehend von folgenden Stichworten durchgeführt: "Carbon Monitoring", "GHG Monitoring", "THG Monitoring", "carbon footprint", "industrial process emission". Basierend auf diesen Ergebnissen wurde die Suche weitergeführt und vertieft um die am weitesten etablierten, repräsentativen Methoden des Carbon Monitorings auszumachen und zu beschreiben.

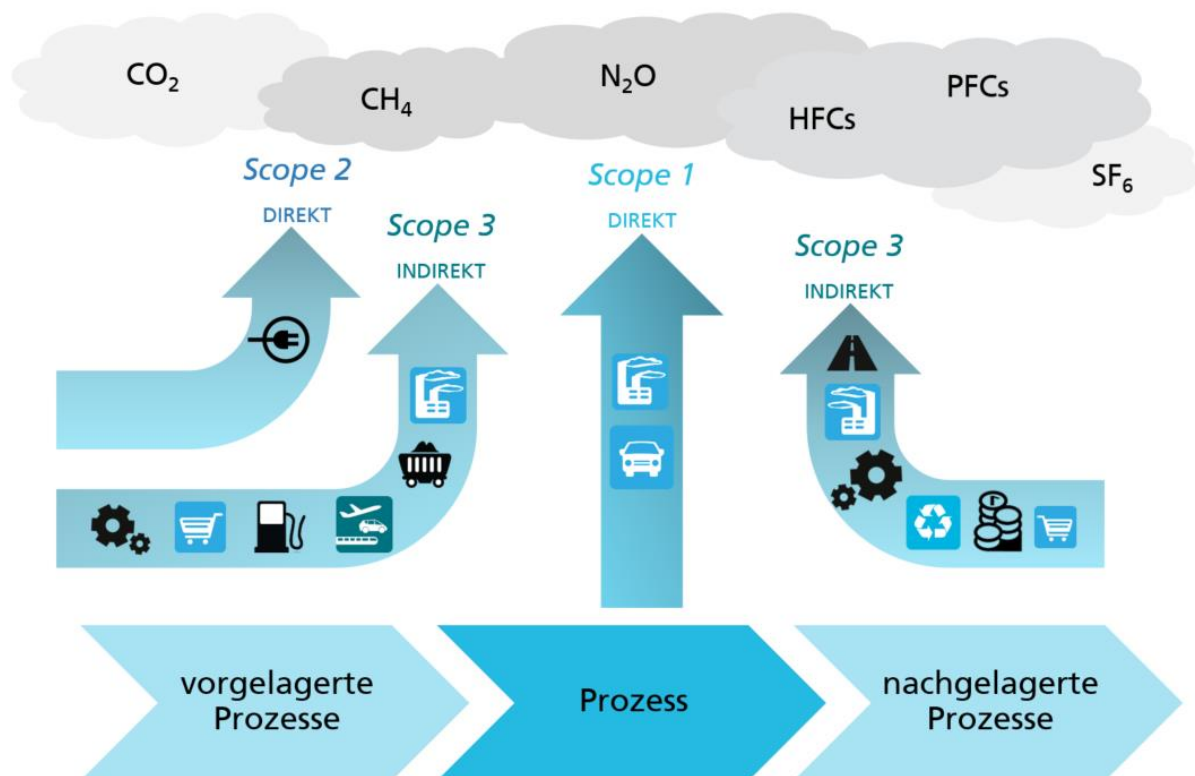
3.2 **Branchenübergreifende Methoden des Carbon Monitorings**

Vor einer Darstellung von Methoden des Carbon Monitorings erscheinen zunächst einige begriffliche Abgrenzungen sinnvoll. Zum einen sollen die unterschiedlichen Emissionen von vor- und nachgelagerten Prozessen Kategorien zugeordnet werden. Weiterhin wird zwischen energiebedingten und prozessbedingten Emissionen unterschieden. Außerdem werden kurz die "Top-down" und "Bottom-up"-Berechnungsmethoden vorgestellt.

3.2.1 **Abgrenzungen**

Einerseits werden Emissionen in unterschiedliche Kategorien unterteilt bzw. zugerechnet (Abbildung 2). Dabei werden Emissionsquellen innerhalb eines betrachteten Unternehmens bzw. einer Anlage als Scope 1-Emissionen bezeichnet. Emissionen aus der Erzeugung von außerhalb bezogener Energie (z.B. Strom, Dampf, Wärme, Kälte, ...) werden den Scope 2-Emissionen zugerechnet. Zu den Scope 3-Emissionen zählen alle weiteren Emissionen, die außerhalb der Anlage und der Energieerzeugung verursacht werden, z.B. bei der Vorproduktion und dem Transport der eingesetzten Materialien oder aus der Weiterverarbeitung, dem Vertrieb und der Entsorgung der Produkte (Greenhouse Gas Protocol, 2011). Je nach Wahl der Systemgrenze werden die entsprechenden Emissionen für das Carbon Monitoring mit einbezogen.

Abbildung 2: Unterscheidung der Emissionen

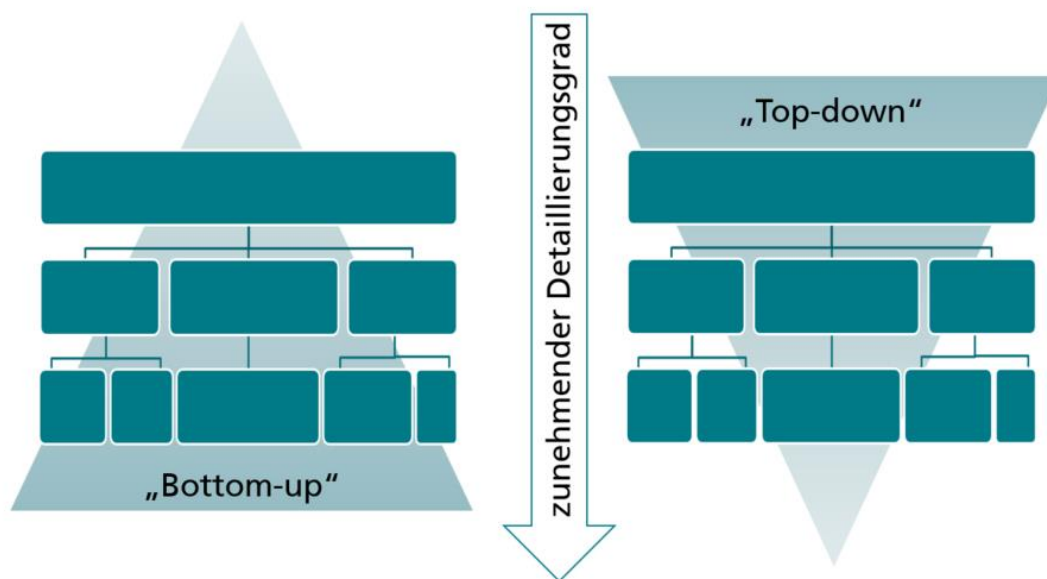


Quelle: Eigene Darstellung orientiert an Greenhouse Gas Protocol, 2011

Außerdem wird zwischen energiebedingten und prozessbedingten Emissionen unterschieden. Erstere sind auf die Bereitstellung bzw. Umwandlung von Energie zurückzuführen; letztere sind stofflich bedingt und ergeben sich aus Stoffumwandlungsprozessen, beispielsweise durch chemische Reaktionen. Bei prozessbedingten Emissionen kann meistens ein genauer Treibhausgas-Ausstoß (CO₂-Emissionen bzw. CO₂-Äquivalente) auf Basis von Stoffmengen beziffert werden, wohingegen energiebedingte Emissionen auf jeden Fall zunächst in CO₂-Äquivalente umgerechnet werden müssen.

Hinsichtlich des Monitorings werden grundsätzlich „Bottom-up“ und „Top-down“ Methoden als Varianten der Datensammlung unterschieden (Abbildung 3). Der „Bottom-up“ Ansatz untersucht die Prozesse „von unten nach oben“, das heißt vom Teilprozess zum Hauptprozess. Dahingegen betrachtet der „Top-down“-Ansatz einen Prozess „von oben nach unten“ und kommt vom Hauptprozess in die detailreichen Teilprozesse. Auch der zeitliche Aufwand bei der Offenlegung der Emissionen spielt hier eine entscheidende Rolle. So können bei dem „Bottom-up“-Ansatz mit 100 % Arbeitseinsatz bis zu 90 % der CO₂-Emissionen aufgezeigt werden. Bei dem „Top-down“-Ansatz können, bei einem deutlich geringeren Aufwand von 20 % Arbeitseinsatz, bis zu 80 % der Emissionen ermittelt werden (DFGE, 2013).

Abbildung 3: Vergleich "Bottom-up" und "Top-down" Methode



Quelle: Eigene Darstellung orientiert an Institute for Energy, Ecology and Economy, 2013

Näher beschrieben werden die "Top-down" und "Bottom-up"-Berechnungsmethoden auch in der **DIN EN 16212** (DIN EN 16212, 2012).

3.2.2 Prinzipielle Vorgehensweisen

Es existiert bereits ein breites Spektrum an Möglichkeiten für Berechnungs- und Bilanzierungsmethoden von CO₂-Emissionen. Unter der Vielzahl an bestehenden Methoden werden im Folgenden die am weitesten etablierten und repräsentativen Methoden, die exemplarisch die Weite der Möglichkeiten widerspiegeln sollen, genauer beschrieben und gegenübergestellt. Dabei können **drei prinzipielle Ansätze** unterschieden werden. In Tabelle 2 sind diese drei Verfahren im Rahmen einer Untersuchungsmatrix gegenübergestellt.

Schwerpunkte der Literaturrecherche in Arbeitspaket 1 liegen wie in der Zielsetzung in 0 genannt. Die Methoden werden dahingehend untersucht, ob eine echtzeitorientierte Bestimmung möglich ist und ob diese für komplexe Prozesse geeignet ist (**Echtzeitorientierung**). Um den Vergleich zu einer Baseline zu ermöglichen, sollten externe Einflussfaktoren (zum Beispiel klimatisch bedingte Einflüsse) während dem Carbon Monitoring bereinigt werden. Die Wahl der Baseline, ob auf Basis konstant angenommener Koeffizienten oder physikalischer Wirkzusammenhänge soll ebenfalls untersucht werden (**Bewertungsorientierung**). Zudem sollte innerhalb der Methode eine Bewertung stattfinden können, inwieweit Dekarbonisierungs-Maßnahmen gewirkt haben (**Nachweisorientierung**). Weiterhin wird die Wahl der Systemgrenze verglichen (**Konsistenz in den Systemgrenzen**) und inwieweit die Emissionen aus vorgelagerten Prozessen (und bei inhärentem CO₂ auch nachgelagerten Prozessen) verursachungsgerecht berücksichtigt werden (**Verursachungsorientierung**).

Tabelle 2: Übersicht der Carbon Monitoring Methoden

| Methode | Lebenszyklusanalyse (LCA), Ökobilanz, DIN EN ISO 14044, PAS2050 | Greenhouse Gas Protocol basierend auf 2006 IPCC Guideline, DIN EN ISO 14064, DIN EN ISO 14067 | Input-Output-Analyse (IAO) |
|--|--|---|--|
| Level | Mikroebene, Prozessanalyse, „Bottom-up“ | Mikroebene, Berechnung mit Hilfe empirischer Gleichungen & komplexeren Modellierungen | Makroebene, „Top-down“ |
| Ziel der Methode | Verständnis und Berücksichtigung Umweltwirkung | Überwachung THG-Emissionen | Darstellung vernetzter Produktionssysteme und deren THG-Emissionen |
| Entwicklung / Hintergrund | Umweltschutz | Initiative von Nichtregierungsorganisation | Volkswirtschaftliche Modellrechnung |
| Bilanzierung | Scope 1, 2, 3 | Abhängig von der Systemgrenze, oft nicht Scope 3 | Abhängig von der Systemgrenze |
| Untersuchte Daten | Physikalische Abläufe (Energie-, Rohstoff-, Betriebsstoff-Inputs, Produkte, Koppelprodukte und Abfall; Emissionen in Luft, Wasser und Boden und weitere Umweltaspekte) | Aktivitätsdaten, Berechnung von Emissionsfaktoren (Nur THG-Emissionen) | Stoffströme/Aktivitäten (Typischerweise Jahresemissionen) |
| Systemgrenze | Cradle-to-Grave Produktlebenszyklus | Wählbar | Wählbar |
| Zeitliche Dimension | Produktlebenszyklus | Jahresemissionen | |
| Bewertungsorientierung (Baseline) | Konkurrenzprodukt | Jahresemissionen eines Baseline-Jahres | Typischerweise Jahresemissionen |
| Vorteile | Fokussierung auf einzelne Prozesse möglich | Detaillierte Berechnung für gegebene Prozesse | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Einfache Datenerfassung ▪ Komplette Systemgrenze |
| Nachteile | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Abhängig von Systemgrenze ▪ Große Anzahl von Prozessen im Gesamtsystem | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nur für geschlossene Systeme ▪ Nicht für alle Prozesse verfügbar | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Begrenzte Eignung für Prozessbewertung ▪ Daten häufig nicht ausreichend vorhanden |

3.2.3 Ökobilanzierung

Eine direkte Prozessanalyse und die am häufigsten verwendete Methode für Treibhausgas-Monitoring stellt die Lebenszyklusanalyse oder Ökobilanzierung dar. Es handelt sich um einen "Bottom-up"-Ansatz. Die Ökobilanzierung ist in den Normen der **ISO 14040er-Reihe** (DIN EN ISO 14044, 2021) kodifiziert. Hierbei werden die einzelnen Prozessschritte für die gesamten CO₂-Emissionen auf Mikroebene addiert. Den Berechnungen liegen die physikalischen Abläufe zu Grunde. Die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse werden dann mit möglichen Vergleichsprodukten verglichen und bewertet. Der Ansatz hat ein hohes Fokussierungs-Potential, da einzelne Prozesse genau untersucht werden können (PAS 2050, 2011). Als Nachteil kann der hohe Zeit- und Arbeitsaufwand mit den großen erforderlichen Datenmengen gesehen werden (Dong, Geng, Xi, & Fujita, 2013), (Jiang, Liu, Li, Zhang, & Iqbal, 2014). Außerdem kommt es zu unterschiedlichen Berechnungen je nach Wahl der Systemgrenze (Dong, Geng, Xi, & Fujita, 2013). Auch die direkte Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen LCA-Studien ist nicht immer gewährleistet (PAS 2050, 2011).

3.2.4 Greenhouse Gas Protocol

Ein weiterer prinzipieller Ansatz wird im Greenhouse Gas Protocol oder in der IPCC Guideline und in der **DIN EN ISO 14064** und **DIN EN ISO 14067** beschrieben. Hier wird keine umfassende Lebenszyklusanalyse durchgeführt. Zudem werden ebenfalls Aspekte der Prozessanalyse verwendet (Greenhouse Gas Protocol, 14.06.2021), (IPCC, 2006), (DIN EN ISO 14064-2, 2020), (DIN EN ISO 14067, 2019). Hierbei werden mit detaillierten Berechnungsformeln und -prinzipien für verschiedene Quellen die Emissionen bestimmt und mit einem Baseline Jahr verglichen (Dong, Geng, Xi, & Fujita, 2013). Für bestimmte Prozesse existieren hier detaillierte und vorgefertigte Berechnungstools mit Excel-Tabellen (Greenhouse Gas Protocol, 14.06.2021). Diese Methode ist jedoch nur für geschlossene Systeme geeignet und kann meistens nicht für indirekte Emissionen genutzt werden (Dong, Geng, Xi, & Fujita, 2013).

3.2.5 Input-Output-Analyse

Die „Input-Output-Analyse“ (IAO) basiert auf einer klassischen volkswirtschaftlichen Modellrechnung, die auch für CO₂-Emissionen genutzt werden kann. Es liegen als Berechnungsgrundlage auf Makroebene hauptsächlich Daten über mehrere Schritte eines Produktionsprozesses hinweg aus der Beziehung zwischen Einsatzgrößen (Input) und Ausbringungsgrößen (Output) vor. Diese Input-Output-Tabellen basieren auf monetären und physischen Stoffströmen (PAS 2050, 2011). Dafür wird zunächst eine Systemgrenze festgelegt (Jiang, Liu, Li, Zhang, & Iqbal, 2014). Der Vorteil dieser Methode ist die Möglichkeit der Berücksichtigung weit vorgelagerter Prozessstufen und eine damit verbundene bessere prozessbasierte Modellierung (Islam, Ponnambalam, & Lam, 2016). Zudem fällt die Datenerfassung leichter und daraus folgt eine niedrigere Zeit- und Arbeitsintensität (Jiang, Liu, Li, Zhang, & Iqbal, 2014). Probleme ergeben sich jedoch, da die Daten aus der drei- bis fünfjährigen Vergangenheit benötigt werden und diese erforderlichen Datenmengen meistens nicht ausreichend vorhanden sind (Islam, Ponnambalam, & Lam, 2016). Nachteilig ist zudem die Nicht-Berücksichtigung von Verwendung und Entsorgung der Prozessprodukte (Jiang, Liu, Li, Zhang, & Iqbal, 2014).

Zusätzlich zu den in obiger Tabelle aufgeführten genannten repräsentativen und am weitesten durch nationale und internationale Normen etablierten Methoden gibt es noch diverse hybride Methoden und Kombinationen aus der Lebenszyklusanalyse und der Input-Output-Analyse (Islam, Ponnambalam, & Lam, 2016). Hierbei können die Robustheit der Input-Output-Analyse mit der Genauigkeit von Lebenszyklusanalysen kombiniert werden (Dong, Geng, Xi, & Fujita, 2013).

Eine Nachweisorientierung ist bei allen drei Ansätzen möglich. Die Verursachungsorientierung ist teilweise möglich. Die Konsistenz in den Systemgrenzen im Vergleich zu einem Referenz-Zustand ist nicht immer thematisiert, da die Verfahren vorrangig auf die Bestimmung von Carbon Footprints und nicht auf die Verbesserungen durch Maßnahmen eingehen. Jedoch ist bei allen drei Ansätzen keine ausreichende Methode für die Modellierung von komplexen Prozessen gegeben. Auch eine Echtzeitorientierung kann bei allen drei Ansätzen nicht gewährleistet werden.

3.2.6 Spezielle Vorgehensweisen

Neben den bereits genannten prinzipiellen, repräsentativen und am weitesten etablierten Verfahren gibt es viele weitere hybride oder spezielle Varianten. Im Folgenden sollen einige spezielle Vorgehensweisen genauer beschrieben werden.

Benchmarking

Eine weitere Methode ist das Benchmarking nach **DIN EN 16231 - Energieeffizienz-Benchmarking-Methodik**. Diese betrachtet, wie effizient verschiedene Systeme einen vergleichbaren Nutzen erzeugen können (Ratjen, Lackner, Kahlenborn, & Gsellmann, 2013). Dies kann ebenfalls als Instrument für den Vergleich eingeführt werden und zur Bewertung von Energieverbräuchen dienen (Sontag, et al., 2014). Dies wurde im Rahmen des EU-ETS für den Vergleich von CO₂-Emissionen verwendet. Als Vergleichsbasis dient hier der effizienteste vorhandene Prozess oder Technologie. Auf dieser Basis werden die CO₂-Emissionen der Unternehmen bewertet und das CO₂-Emissions-Trading-System etabliert (Neelis, et al., 2009). Mit einem Benchmarking-System können die verschiedenen Prozesse neben dem reinen Vergleich der CO₂-Emissionen auch nach den Emissionen gebündelt oder kategorisiert werden (Sontag, et al., 2014). Zudem können durch den Vergleich mit weiteren vorhandenen Prozessen Einsparmöglichkeiten aufgezeigt werden (Sontag, et al., 2014).

Energetische Bewertungen von Gebäuden

In der **DIN V18599-1** wird die Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung beschrieben und auf allgemeine Bilanzierungsverfahren und Bewertung der Energieträger eingegangen. Es erfolgt eine Energiebilanz der Nutz-, über die End- bis zur Primärenergie und für alle Arten der Konditionierung bzw. für alle technischen Gewerke nach integralem Ansatz und ein Bewerten des Baukörpers und der Anlagentechniken im Hinblick auf mögliche Wechselwirkungen untereinander. Diese Energiebilanz kann in CO₂-äquivalente Emissionen umgewandelt werden (DIN V 18599-1, 2016).

Energiemanagementsysteme - Energieleistungskennzahlen (EnPI)

Um den Energieverbrauch eines Unternehmens über einen bestimmten Zeitraum zu bestimmen, können Energieleistungskennzahlen nach **DIN EN ISO 50001** und **DIN ISO 50006** eingesetzt werden (DIN EN ISO 50001, 2018), (DIN ISO 50006, 2014). Über die energiebezogenen Leistungen wie Energieverbrauch, Energieeinsatz, und Energieeffizienz kann die sogenannte Energieleistungskennzahl EnPI berechnet werden und dieser aktuelle Wert mit einem Referenz-EnPI-Wert verglichen werden. Die Verbesserung der EnPI vom Berichtszeitraum gegenüber dem Bezugszeitraum werden

berichtet (DIN ISO 50006, 2014). Um eine geeignete Leistungskennzahl zu bestimmen, wird bei den Hauptarten von EnPIs entweder zwischen dem tatsächlich gemessenen Energiewert oder dem Verhältnis von Messwerten als Ausdruck der Energieeffizienz unterschieden (DIN ISO 50006, 2014). Die Referenz-EnPI, mit der diese EnPI verglichen wird, ist bei wesentlichen Verbrauchsbereichen ein Baseline-Modell, das die Abhängigkeit des Energieaufwands von dem erzeugten Nutzen eines Systems und weiteren signifikanten externen Einflussgrößen beschreibt (Ratjen, Grabowski, & Dr. Rohde, EnPI-Connect - Energiekennzahlen für Monitoring und Benchmarking, 2020). Die Modellierung erfolgt anhand statistischer und/oder physikalischer Zusammenhänge.

Energieaudits

Ein Energieauditprozess unterstützt ein Unternehmen darin die Energieeffizienz zu verbessern und den Energieverbrauch zu verringern. Dies kann nach **DIN EN 16247** erfolgen. Der Energieeinsatz wird systematisch untersucht und die Energieverbräuche analysiert und nach Verbrauchs- und Versorgungsseite aufgeschlüsselt, um die Energieflüsse und Energieverbesserungspotentiale zu finden (DIN EN 16247-1, 2012). Dabei werden ebenfalls Energieleistungskennzahlen für die Evaluierung verwendet. Dieser Prozess könnte auf die Betrachtung von CO₂-Emissionen übertragen werden.

3.3 Branchenspezifische Konkretisierungen

Im Folgenden Abschnitt soll zunächst eine Übersicht über die bisherigen Anwendungsbereiche von Carbon Monitoring gegeben werden. Dies geschieht anhand der Klassifizierung des statistischen Bundesamtes.

Um die Herausforderungen von komplexer Prozesstechnik und Batch-Prozessen darzustellen, werden dann anhand der Zement- und der Aluminiumherstellung die Vorgänge des Carbon Monitorings nach dem Greenhouse Gas Protocol und der 2006 IPCC Guideline exemplarisch durchgeführt.

3.3.1 Übersicht

Die unter Abschnitt 3.2 beschriebenen Carbon Monitoring Methoden werden bezüglich möglicher genauer beschriebener Anwendungsbereiche innerhalb der Klassifizierung des statistischen Bundesamtes untersucht. Besteht eine mögliche Anwendung in Teilbereichen in den unterschiedlichen Gruppen ist dies in Tabelle 3 vermerkt.

Innerhalb der Klassifizierung des statistischen Bundesamtes werden 24 Abteilungen mit diversen Untergruppen und -klassen gebildet. Hier gibt es beispielsweise mögliche Carbon Monitoring Anwendungen des Greenhouse Gas Protocols oder der IPCC-Guideline in der Holzproduktion und in der Eisen-/ Stahl-/ Hüttenkoksherstellung. Ebenso bei den, unter die Gruppe 20 fallenden, Herstellungsverfahren von Ammoniak, Fluorkohlenwasserstoffen oder Salpetersäure. Auch für die Herstellung von Zement, Kalk, Glas, Keramiken und Asphalt, sowie zu der Gruppe 24 und 25 gehörenden Herstellungsverfahren von Aluminium, Magnesium, Zink und Blei gibt es bereits bekannte Verfahren. Als ein Beispiel in Gruppe 27 kann die Halbleiterindustrie genannt werden. (Greenhouse Gas Protocol, 14.06.2021) (IPCC, 2006)

Tabelle 3: Anwendungsbereiche von Carbon Monitoring in Wirtschaftszweigen nach der Unterteilung des Statistischen Bundesamtes (Bundesamt, 2008).

| Wirtschaftszweig 2008 C – verarbeitendes Gewerbe | | für Teilbereiche Anwendung |
|--|---|----------------------------|
| 10, 11, 12 | Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln, Getränkeherstellung, Tabakverarbeitung | |
| 13, 14, 15 | Herstellung von Textilien, Bekleidung, Leder, Lederwaren und Schuhen | |
| 16, 31 | Herstellung von Holz-, Flecht-, Korb- und Korkwaren, Herstellung von Möbeln | ✓ |
| 17 | Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus | |
| 18 | Herstellung von Druckerzeugnissen; Vervielfältigung von bespielten Ton-, Bild- und Datenträgern | |
| 19 | Kokerei und Mineralölverarbeitung | ✓ |
| 20 | Herstellung von chemischen Erzeugnissen | ✓ |
| 21 | Herstellung von pharmazeutischen Erzeugnissen | |
| 22 | Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren | |
| 23 | Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden | ✓ |
| 24, 25 | Metallerzeugung und -bearbeitung (auch NE), Herstellung von Metallerzeugnissen | ✓ |
| 26 | Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen, | ✓ |
| 27 | Herstellung von elektrischen Ausrüstungen | |
| 28, 33 | Maschinenbau, Reparatur und Installation von Maschinen und Ausrüstungen | (✓) |
| 29, 30 | Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen, Sonstiger Fahrzeugbau | |
| 32 | Herstellung von sonstigen Waren | |

Im Folgenden werden die vorhandenen Carbon Monitoring Möglichkeiten anhand von Beispielen aus zwei prozessintensiven Bereichen eingehender dargestellt.

3.3.2 Beispiel Zementherstellung

Ein erstes Beispiel soll die Berechnung der prozessbedingten CO₂-Emissionen der Zementproduktion anhand der 2006 IPCC Guideline zeigen (IPCC, 2006). Eine Besonderheit der IPCC Guideline ist die Unterteilung in Tier 1, 2 und 3 Methoden, je nach Komplexität der Rechenmethode. Tier 3 ist hierbei die genaueste Berechnung, da die exakten Prozessdaten verwendet werden. Tier 2 und 3 verwenden häufiger geschätzte oder gerundete Werte für die Prozessdaten.

Im Folgenden wird der Tier 3 Ansatz für die Berechnung der CO₂-Emissionen bei der Zementherstellung genauer untersucht. Die Emissionen werden hier auf Basis der Carbonat-Rohstoffzufuhr zum Ofen betrachtet und über Gewichtsanteile und Emissionskoeffizienten berechnet.

$$CO_2 \text{ Emissionen} = [\sum_i (EF_i \cdot M_i \cdot F_i) - M_d \cdot C_d \cdot (1 - F_d) \cdot EF_d + \sum_i (M_k \cdot X_k \cdot EF_k)] \text{ (in Tonnen)}$$

mit

EF_i, EF_d, EF_k = Emissionskoeffizienten

M_i = Gewicht Carbonate in Tonnen

F_i, F_d = Anteile erreichter Kalzinierung der Carbonate

M_d = Gewicht Zementofenstaub (nicht recycelt) in Tonnen

C_d = Gewichtsanteil des ursprünglichen Karbonats im Zementofenstaub

M_k = Gewicht organisches/kohlenstoffhaltiges Nicht-Brennstoff-Rohmaterial in Tonnen

X_k = Anteil gesamtes organischen oder sonstigen Kohlenstoffs im Nicht-Brennstoff-Rohmaterial

Mit diesem Ansatz lassen sich die CO₂-Emissionen eines Referenz-Systems nachvollziehen. Aussagen zur Wahl der Systemgrenzen im Vergleich mit Dekarbonisierungsvorhaben, die sich über mehrere Wertschöpfungspfade erstrecken, werden jedoch nicht getroffen.

3.3.3 Beispiel Aluminiumherstellung

Die Komplexität der benötigten Berechnungen wird im folgenden Abschnitt ersichtlich, in der ein Teil der Berechnung der CO₂-Emissionen der Aluminiumherstellung dargestellt wird. Dies erfolgt nach den Vorgaben des Greenhouse Gas Protocol.

Es handelt sich bei dieser Berechnung ebenfalls um die Berechnung im Rahmen der Tier 3 Methode. Aufgrund der Komplexität der unterschiedlichen Teilprozesse wird beispielhaft nur auf den Teilprozess der Anodenproduktion eingegangen.

In diesem Fall werden die CO₂-Emissionen über die gesamte Metallerzeugung, den Netto-Anoden-Verbrauch und dem Anodengehalt abzüglich des Schwefel- und Aschegehaltes berechnet. Um zum Schluss die CO₂-Emissionen zu erhalten wird das Produkt noch mit dem Verhältnis des Molekulargewichtes von Kohlenstoff zu CO₂ multipliziert.

$$CO_2 \text{ Emissionen} = \left[MP \cdot NAC \cdot \frac{100 - S_a - Ash_a}{100} \right] \cdot \frac{44}{12} \text{ (in Tonnen pro Jahr)}$$

mit

MP = Gesamtmetallerzeugung

NAC = Netto-Anoden-Verbrauch

S_a = Schwefelgehalt in der Anode

Ash_a = Aschegehalt in der Anode

$44/12$ = Verhältnis Molekulargewicht von Kohlenstoff zu CO₂

Auch dieser Ansatz dient der Bestimmung von CO₂-Emissionen eines Referenz-Systems.

3.4 Zusammenfassung der Erkenntnisse und Schlussfolgerungen für die weiteren Arbeiten

Die Schlussfolgerungen des Arbeitspaketes 1 nehmen Bezug auf den Weiterentwicklungsbedarf einer Carbon Monitoring Methode für komplexe Industrieprozesse. Es kann festgehalten werden, dass für bestimmte Industriebranchen und -prozesse bereits detaillierte, repräsentative Vorgehensweisen vorliegen. Jedoch zielen diese nicht, wie bei Dekarbonisierungsvorhaben häufig gefordert, auf die Systemgrenzen der Referenz-Zustände inkl. Verwertungsketten. Die **Konsistenz in den Systemgrenzen zwischen Soll-Zustand und Referenzzustand** erfährt dadurch keinen Beitrag. Ferner existiert keine allgemeine Vorgehensweise zur Vorsorge effizienter Betriebsweisen der dekarbonisierten Prozesse. Die **Verursachungsorientierung** ist nicht immer oder nur teilweise möglich. Die Anforderung der **Echtzeitorientierung** wird daher von den bisherigen Methoden auch nicht abgedeckt. Eine **Nachweisorientierung** ist bisher weitestgehend möglich. Für die **Bewertungsorientierung** ist die Definition der Referenz oder Baseline für vergleichende Studien entscheidend. Auch der Einfluss von äußerlichen bzw. externen Einflussfaktoren (klimatische Bedingungen/Witterungsbedingungen, variierende Produkt- oder Rohstoffeigenschaften, ...) wird bei den untersuchten Methoden kaum berücksichtigt, dabei spielen diese eine wichtige Rolle in Bezug auf einen bereinigten Emissionsvergleich bei detaillierten Auswertungen.

4 Arbeitspaket 2: Nachweis der Übertragbarkeit der Kennzahlenmethodik auf Carbon Monitoring

4.1 Nachweis der Übertragbarkeit der Kennzahlenmethodik im Rahmen eines Kurzleitfadens: Product Carbon Footprints und Product Carbon Costs

Autoren: Ratjen, Georg; Grabowski, Knut; Dr. Harfst, Nathanael

4.1.1 Hintergrund, Zielsetzung und Vorgehen

Grundlage für die Konzeptstudien im Vorhaben Carbon Monitoring ist die Methodik zur Aufstellung von Energiekennzahlen (Grabowski, Dr. Kubin, & Ernst, 2014), die im Rahmen des Vorhabens EnPI-Connect erfolgreich in der Industrie erprobt wurde (Ratjen, Grabowski, & Dr. Rohde, EnPI-Connect - Energiekennzahlen für Monitoring und Benchmarking, 2020). Die Praxispartner im Vorhaben waren das Mercedes Benz Werk Berlin Marienfelde, City Clean und Stockmeyer. Mit Hilfe der Kennzahlenmethodik konnten entlang eines einheitlichen Einführungsplans aussagekräftige, genaue Realtime Benchmarking und Monitoringsysteme implementiert werden. Die Erkenntnisse zeigten Energieeffizienzpotenziale insbesondere bei der Regelungstechnik auf, die im Anschluss ausgeschöpft wurden. Die hohe Praxistauglichkeit wurde in einem Review durch das Fraunhofer ISI bestätigt. Die Ergebnisse flossen in zahlreiche Industrieprojekte, aber auch in die Hochschullehre ein.

Bei der Bilanzierung von Dekarbonisierungsprojekten in der Industrie fehlt es bislang an einheitlichen praktikablen Standards. Eine der Handlungsempfehlungen war daher die Übertragung der Methodik für Energiekennzahlen auf prozessbedingte CO₂-Emissionen im Kontext der Dekarbonisierung der Industrie. Ziel des Arbeitspakets 2 im Vorhaben Carbon Monitoring war der Transfer und Erweiterung der EnPI-Connect-Leitfäden zur Kennzahlenmethodik auf prozessbedingte CO₂-Emissionen und auf Kosten für CO₂. Die Materialien bildeten die Grundlage für die Entwicklung von Wegweisern für die Industriepartner. Im Verlauf der Wegweiser wurden wiederum als iterativer Prozess Anpassungen an den hier entwickelten Materialien vorgenommen. In diesem Zuge wurden auch die EnPI-Connect Leitfäden aus dem Vorgängerprojekt aktualisiert

Tabelle 4: Anwendungsbeispiele von Carbon Monitoring

| | |
|--|---|
| Erfassung | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Auswirkung von Dekarbonisierungsvorhaben auf CO_{2e}-Emissionen nachvollziehen • Kalkulatorische Kosten für CO_{2e} ermitteln und in der Investitionsplanung ansetzen | |
| Monitoring | Benchmarking |
| <ul style="list-style-type: none"> • CO_{2e}-Vermeidung aufgrund von Effizienzmaßnahmen genau auswerten. • Verbesserungen unter Berücksichtigung externer Einflussgrößen nachweisen • Effizienz in Realtime überwachen und Frühwarnsysteme aufbauen • Anlagen vorausschauend und bedarfsabhängig warten (Predictive Maintenance) | <ul style="list-style-type: none"> • Vermeidungspotenziale mittels Benchmarking mit anderen Anlagen quantifizieren • CO_{2e}-Emissionen und –Kosten alternativer Produktion an eigenem Standort simulieren • Vermeidungspotenziale mittels statistischer Tiefenanalyse aufdecken • Die Effizienz der Produkterstellung im Vergleich mit Bestanlagen einschätzen |

Quelle: Eigene Darstellung

4.1.2 Product Carbon Footprints (PCFs) und Costs (PCCs)

„Product Carbon Footprints und Product Carbon Costs: Kennzahlen für den Klimaschutz“ richtet sich an Unternehmen, die Klimaschutzmanagement betreiben und ihre Kennzahlen und ihr Effizienzcontrolling verfeinern wollen. Grundlagen sind Materialien aus dem Projekt EnPI-Connect (ÖKOTEC, Fraunhofer ISI, DENEFF) und die Kennzahlenmethodik, die ÖKOTEC und DENEFF im Auftrag des BMU entwickelt haben.¹ Erkenntnisse aus dem Vorhaben Realtime-Carbon Footprint fließen ebenso ein, wie Regelungen aus der ISO 14064, ISO 14067 und dem GHG-Protocol (DIN EN ISO 14067, 2019). Besondere Beachtung finden auch die Überwachungspläne in der 4. Handelsperiode der DEHSt (DEHSt, 2020). Ferner werden Vorgehensweisen der ISO 50006 auf den Untersuchungsgegenstand CO_{2e} angewendet (DIN ISO 50006, 2014). Ebenso geben wir Anregungen für kalkulatorische Kosten, um CO_{2e}-Emissionen z. B. bei Investitionsentscheidungen besser einzubeziehen. Dieser Kurzleitfaden zeigt Ihnen, wie Sie:

- **Product Carbon Footprints und Costs bei einzelnen und vernetzten Anlagen erfassen**

Dieser Kurzleitfaden beschreibt, wie Sie CO_{2e}-Emissionen anhand sinnvoller Kennzahlen bestimmen und verursachungsgerecht zuweisen. Dadurch erhalten Sie Transparenz, welche stofflichen und energetischen Aufwände (z. B. Strom, Kältemittel, Frischwasser) bei diesen Anlagen (z. B. Kälteanlage) zur Erzeugung eines Nutzens (z. B. Kälte) anfallen und wie viele CO_{2e}-Emissionen und CO_{2e}-bedingten Kosten dabei direkt und indirekt entstehen. Der Kurzleitfaden zeigt zudem, wie Sie Kennzahlen vernetzen, um den „CO_{2e}-Rucksack“ und dazugehörige Kosten entlang der Fertigungs- und Versorgungskette nachverfolgen zu können. Im Zuge tiefgreifender Dekarbonisierungsvorhaben können Sie damit auch die CO_{2e}-Emissionen im Ist- und Soll-Zustand gegenüberstellen und die Wirksamkeit nachvollziehen. Ein ergänzender Leitfaden „Steuerung von Carbon-Costs in bestehenden Controlling- und Kostenrechnungs-Systemen“ geht speziell auf Herausforderungen für das kaufmännische Controlling ein.

- **Kennzahlen für genaues Effizienz-Monitoring einsetzen**

Die Veränderung der CO₂-Emissionen hängt nicht nur von den Maßnahmen ab, die Sie umsetzen. Die Systemumwelt (z. B. Witterung, Auftragseingänge und damit verbundene Auslastungszustände) kann erheblichen Einfluss haben. Reine Verhältniszahlen, die sich nur auf den Nutzen beziehen, greifen in diesen Fällen zu kurz. Die Broschüre zeigt Vorgehensweisen, wie Sie externe Einflussgrößen für ein exaktes Monitoring bereinigen. Dadurch können Sie eine Effizienzüberwachung inkl. Frühwarnfunktion (Alarm bei untypischen Aufwänden) aufbauen und die Wirksamkeit Ihrer Effizienzoptimierungen im Betrieb überprüfen. Wartungsintensive Anlagen können Sie zudem mit dem Ziel der Effizienzerhaltung vorausschauend warten (Predictive Maintenance). Ein weiteres Einsatzgebiet ist die Definition und Prüfung von Effizienzzielen für den Anlagenbau.

- **Kennzahlen für das Effizienz-Benchmarking einsetzen**

Mit der Kennzahlenmethodik können Sie aufdecken, wie effizient ein Prozess im Vergleich zu anderen, vergleichbaren Prozessen arbeitet. Dabei stellen Sie im Benchmarking z. B. zwischen verschiedenen Unternehmensstandorten Alternativen bei der Anlagentechnik gegenüber, die für die Erzeugung eines Nutzens mit bestimmten Eigenschaften (z. B. eines bestimmten Produktes) als substitutiv eingesetzt werden können. So können Sie die klimafreundlichste Technik schnell aufspüren. Ferner gewinnen Sie Erkenntnisse zu optimalen Regelungseinstellungen.

¹ Dieser Kurzleitfaden baut auf die Kennzahlenmethodik auf. Diese ist frei abrufbar unter: <https://www.oekotec.de/energiekennzahlen/>

4.1.3 Produktionsprozesse als Systeme mit Nutzen und Aufwänden

Unser Ziel ist es, geeignete Kennzahlen für Produktionsprozesse zu bestimmen und darauf aufbauend, die Kennzahlen im Monitoring und Benchmarking zu nutzen. Ausgangspunkt ist die Beschreibung von Produktionsprozesse als Systeme, die **Nutzen** produzieren und **Aufwände** aufweisen.

Abbildung 4: System mit Nutzen und Aufwand

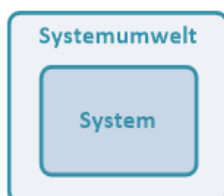


Quelle: Eigene Darstellung

Wir betrachten Systeme hier als **Black-Box**. Die internen Eigenschaften des Systems sind für uns hier nicht relevant. Uns interessiert an dieser Stelle nicht, wie häufig das System gewartet wird, welche Komponenten verbaut oder verschlissen sind oder welcher Ausschuss anfällt. Uns interessiert, welchen **Nutzen** ein System erzeugt und welche **Aufwände** es aufweist. Der Nutzen des Systems besteht in der Veränderung der Eigenschaften von Stoffen und Energien mit Blick auf ihre Verwendbarkeit (in nachfolgenden Systemen).² Der Nutzen kann auch im Transport oder in der Erbringung von Dienstleistungen liegen. Er drückt eine „Wertschöpfung“ aus. Die Aufwände sind – aus Perspektive des Klimaschutzmanagements – die im System anfallenden Aktivitäten, die mit CO_{2e}-Emissionen behaftet sind. Neben direkten CO_{2e}-Emissionen im System („Gate to Gate“) berücksichtigen wir dabei auch indirekte CO_{2e}-Emissionen aus vorgelagerten Systemen („Cradle to Gate“) und ggf. nachgelagerten Systemen (Gate to Grave“)³.

Bei einer Kälteanlage besteht der Nutzen in der Erzeugung von Kälte. Der Nutzen setzt sich aus seiner Nutzensgröße und seinen Eigenschaften zusammen. Die **Nutzensgröße** kennzeichnet die Menge und Einheit, in der der Nutzen quantifiziert werden kann. Bei der Kälteerzeugungsanlage kann eine Nutzensgröße z. B. 80 kWh Kälteenergie über einen definierten Messzeitraum von z. B. einer Stunde sein (80 kW Kälteleistung). Die **Eigenschaften** geben Aufschluss zur Fertigungstiefe. Bei einer Kälteanlage mit dem Kälteüberträger Wasser ist die Fertigungstiefe durch die durchschnittliche Temperatur des Kaltwassers, das die Kälteanlage im Messzeitraum verlässt (z. B. 5 °C) in Verbindung mit der durchschnittlichen Temperatur des Kühlwassers, das im selben Messzeitraum in die Kälteanlage fließt (z. B. 12°C), gekennzeichnet. Analog zum Nutzen setzen sich Aufwände aus **Aufwandsgrößen** und **Eigenschaften** zusammen. Bei einer Kälteanlage sind der Stromaufwand und Kältemittelleckagen typische Aufwände, die mit CO_{2e}-Emissionen behaftet sind.

Abbildung 5: Externe Einflussgrößen der Systemumwelt



Die Aufwände eines Systems hängen nicht nur vom Nutzen ab. Systeme sind einer Systemumwelt ausgesetzt, die wir nicht sinnvoll steuern können. Sie beeinflusst die Aufwände direkt mit **externen Einflussgrößen** (z. B. Witterung, Anforderungen an die Fertigung, Rohstoffqualitäten). Im Kapitel Monitoring gehen wir auf diesen Aspekt näher ein.

Quelle: Eigene Darstellung

² Oft werden nachfolgende Systeme beliefert. Diese bestimmen i.d.R. die Anforderungen an den Nutzen. Unterschiedliche Produktalternativen können vergleichbaren Nutzen stiften. Ein Beispiel dafür kann z. B. die „Vegetarische Wurst“ als Substitut für „Fleischwurst“ sein.

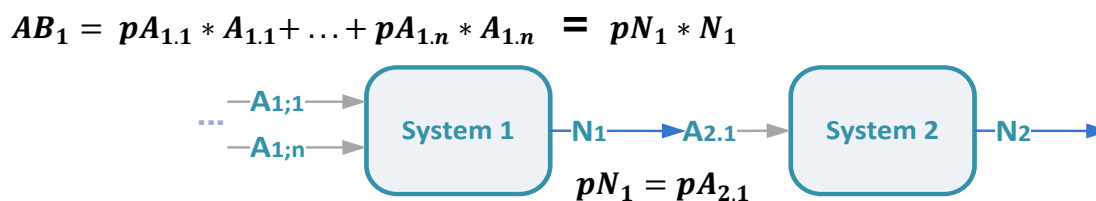
³ „Gate to Grave“ ist z. B. relevant, wenn Maßnahmen die Reduktion von CO₂-Emissionen bei der Verwendung betreffen (z. B. „Design for Recycle“)

4.1.4 Erfassung von Product Carbon Footprints (PCFs) und Costs (PCCs)

4.1.4.1 Grundlagen und Formelsammlung

Unterschiedliche Aufwände (z. B. Gasaufwand, Kältemittelaustritt, Stromaufwand, Aufspaltung Kohlenwasserstoffe) bedingen unterschiedliche CO₂-Emissionen. Wir müssen sie mittels eines einheitlichen Bewertungsverfahrens vereinheitlichen. Für die Auswertung der CO_{2e}-Emissionen nutzen wir als Bewertungsfaktoren **CO_{2e}-Emissionsfaktoren** (z. B. tCO_{2e} pro Stück) der jeweiligen Aufwände. Sollen die Kosten für CO_{2e} ausgewertet werden, multiplizieren wir die CO_{2e}-Emissionsfaktoren mit dazugehörigen CO_{2e} Preisen und erhalten als Bewertungsfaktoren **CO_{2e}-Kostenfaktoren** (z. B. Euro CO_{2e} pro Stück).⁴ Wenn wir jeden Aufwand mit seinem Bewertungsfaktor multiplizieren und die Summe bilden, erhalten wir den gesamten, bewerteten Aufwand: CO_{2e}-Emissionen bzw. CO_{2e}-Kosten. Damit ist der Nutzen behaftet, den das System erzeugt.⁵ Teilen wir die CO_{2e}-Emissionen bzw. CO_{2e}-Kosten durch den Nutzen (hier: N_1 z. B. in Stück), erhalten wir den **Product Carbon Footprint (PCF) bzw. die Product Carbon Costs (PCC)** für den Nutzen (hier: pN_1 , z. B. tCO_{2e} pro Stück).

Abbildung 6: Vernetzung von Systemen anhand von Bewertungsfaktoren



Quelle: Eigene Abbildung

Der Product Carbon Footprint bzw. die Product Carbon Costs (*hier: pN_1*) werden bei nachfolgenden Systemen als CO_{2e}-Emissionsfaktoren bzw. CO_{2e}-Kostenfaktoren für die Aufwände (*hier: $pA_{2.1}$*) übernommen, die sich aus diesem Nutzen speisen. Damit gelingt die Vernetzung der Kennzahlen.

CO₂-Emissionen (z. B. der Verwaltungstätigkeiten) lassen sich nicht immer verursachungsgerecht auf Produkte verteilen. Als Ultima Ratio müssen Sie mit pauschalen Zuschlagssätze arbeiten. Diese können Sie z. B. konsistent an den Gemeinkostenzuschlagssätzen aus dem Controlling ausrichten.

Nomenklatur zur Bedeutung der Schreibweisen in den Beispielen dieser Broschüre

- N_a Nutzen, hier beispielhaft mit der Bezeichnung **a**
- pN_a Bewertungsfaktor für den Nutzen N_a
(PCF: Product Carbon Footprint bzw. PCC: Product Carbon Costs)
- $A_{a,t}$ Ein Aufwand **t** für die Erzeugung des Nutzens N_a
- $pA_{a,t}$ Bewertungsfaktor für diesen Aufwand
(CO_{2e}-Emissionsfaktor bzw. CO_{2e}-Kostenfaktor)
- AB_a Der bewertete Aufwand zur Erzeugung des Nutzens N_a
(*hier: CO_{2e}-Emissionen bzw. CO_{2e}-Kosten*)

⁴ CO_{2e} Preise müssen nicht unbedingt zahlungswirksam sein. Setzen Sie kalkulatorische CO_{2e}-Preise an, um z. B. mit Blick auf Klimastrategie oder Risikomanagement Dekarbonisierungsmaßnahmen in der Investitionsrechnung besserzustellen (vgl. Annex I).

⁵ Sonderfall: Produziert das System mehr als einen Nutzen, fassen wir die Systemgrenzen weiter oder zerlegen das System in Teilsysteme, um Systeme mit nur einem Nutzen zu erhalten. Ist beides nicht möglich, ziehen wir Bewertungsfaktoren substituierter Nutzen heran (vgl. Annex III).

4.1.4.2 Beispiel: PCFs und PCCs bei der Wärmeerzeugung

Abbildung 7: Nutzen-Aufwand-Schema Wärmeerzeugung



Quelle: Eigene Darstellung.

In einer Heizzentrale wird aus Biogas und Erdgas Wärme produziert. Im Jahr 2020 betrug der **Nutzen** 100 MWh Wärmeerzeugung. Als CO_{2e}-relevante **Aufwände** für die Erzeugung des Nutzens wurden 110 MWh Biogas und 10 MWh Erdgas eingekauft. Der eingesetzte Strom ist in diesem Beispiel klimaneutral und wird nicht berücksichtigt. Der Betreiber möchte ermitteln, wie hoch die CO_{2e}-Emissionen und die CO_{2e}-Kosten sind, mit denen der Nutzen behaftet ist. Während in diesem Beispiel im Erdgaspreis eine Kostenkomponente für CO_{2e} enthalten ist (30 € pro Tonne CO_{2e}), wird Biogas nicht vom Brennstoffemissionshandelsgesetz erfasst. Für seine Investitionsentscheidungen möchte der Betreiber jedoch aufgrund seiner Zukunftserwartungen einen einheitlichen kalkulatorischen CO_{2e}-Preis von 100 € pro Tonne ansetzen und in den Stückkosten berücksichtigen. Diese sind aus dem Controlling bekannt und betragen 90 €/MWh_{th} Wärme. Zum Aufschlag auf die bereits in den Stückkosten erfassten zahlungswirksamen Product Carbon Costs möchte er zusätzliche, kalkulatorische PCCs für Wärme ermitteln. Die resultierenden „kalkulatorischen Stückkosten“ will er als Grundlage für Investitionsentscheidungen heranziehen.⁶

CO_{2e}- Emissionen für die erzeugte Wärme

$$pA_{\text{Wärme.Biogas}} * A_{\text{Wärme.Biogas}} + pA_{\text{Wärme.Erdgas}} * A_{\text{Wärme.Erdgas}} = AB_{\text{Wärme}}$$

$$0,152 \frac{tCO_{2e}}{MWh (Bio)} * 110 MWh(Bio) + 0,201 \frac{tCO_{2e}}{MWh (Erd)} * 10 MWh(Erdgas) = 18,73 tCO_{2e}$$

$$PCF = \frac{AB_{\text{Strom}}}{N_{\text{Strom}}} = \frac{18,73 tCO_{2e}}{100 MWh(\text{Strom})} = \frac{0,1873 tCO_{2e}}{MWh (\text{Strom})}$$

CO_{2e}-Kosten auf Grundlage aktueller CO_{2e}-Preise (hier: gemäß BEHG)

$$0 \frac{€}{tCO_{2e}} * 0,152 \frac{tCO_{2e}}{MWh (Bio)} * 110 MWh(Bio) + 30 \frac{€}{tCO_{2e}} * 0,201 \frac{tCO_{2e}}{MWh (Erd)} * 10 MWh(Erdgas) = 60,3€$$

$$PCC (\text{wirksam, bereits in Energiekosten enthalten}) = \frac{AB_{\text{Wärme}}}{N_{\text{Wärme}}} = \frac{60,3 €}{100 MWh(Wärme)} = 0,60 \frac{€ (kalk)}{MWh (Wärme)}$$

Zusätzliche kalkulatorische CO_{2e}-Kosten zum Differenzausgleich zum kalkulatorischen CO_{2e}-Preis

$$100 \frac{€}{tCO_{2e}} * 0,152 \frac{tCO_{2e}}{MWh (Bio)} * 110 MWh(Bio) + 70 \frac{Euro}{tCO_{2e}} * 0,201 \frac{tCO_{2e}}{MWh (Erd)} * 10 MWh(Erdgas) = 1.813,7€$$

$$PCC (\text{zusätzlich kalkulatorisch}) = \frac{AB_{\text{Wärme}}}{N_{\text{Wärme}}} = \frac{1.813 €}{100 MWh(Wärme)} = 18,13 \frac{€ (kalk)}{MWh (Wärme)}$$

$$SK (\text{kalk.}) = SK + PCC (\text{zusätzlich kalkulatorisch}) = (36,60 + 18,13) \frac{€ (kalk)}{MWh (Wärme)} = 54,73 \frac{€ (kalk)}{MWh (Wärme)}$$

⁶ Emissionsfaktoren sind aus BAFA Merkblatt 2021 entnommen, der CO₂-Preis wurde aus dem BEHG übernommen.

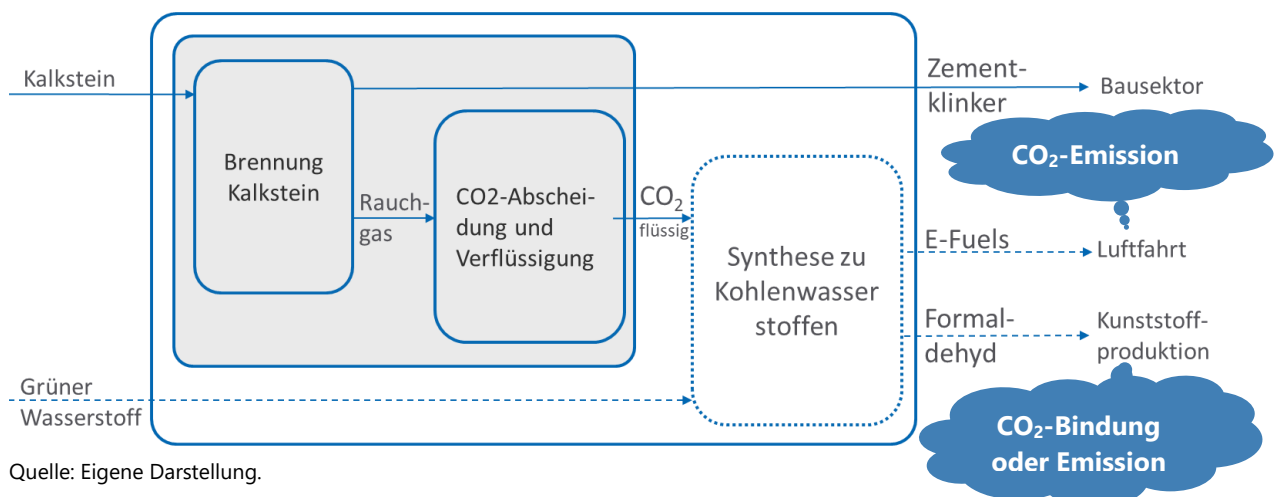
4.1.4.3 Beispiel: Vergleich der Product Carbon Footprints zwischen konventioneller und innovativer Zementproduktion

Beton bietet Belastbarkeiten und Langlebigkeiten, die für viele Bauvorhaben unverzichtbar sind. Zement ist ein wichtiger Bestandteil für Beton. Der entscheidende Schritt bei der Zementherstellung ist die Produktion von Zementklinker. Dabei muss der im Rohstoff Kalkstein gebundene Kohlenstoff losgelöst werden. In dieser grundlegenden chemischen Reaktion fallen unvermeidbar CO₂-Emissionen an. Diese sind eine der größten Herausforderungen auf dem Weg zur Klimaneutralität. Wo ein Ersatz von Zement bzw. Zementklinker nicht möglich ist, kann die Dekarbonisierung nur unter Einbeziehung von CO₂-Abscheidung erfolgen. Ein Zementwerk möchte diesen Weg als Teil seiner Nachhaltigkeitsstrategie beschreiten und das abgeschiedene CO₂ einer Verwertung zuführen, die an anderer Stelle CO₂-Emissionen in Höhe der Emissionen vermeidet. Es liegt u. a. die Interessensbekundung eines Produzenten von E-Methanol vor, der das CO₂ mit grünem Wasserstoff zunächst zu synthetischem Kerosin für die Luftfahrt weiterverarbeiten möchte. Weitere Interessenten gibt es aus der Kunststoffindustrie.

Da der Beitrag von CCU-Verfahren zur Dekarbonisierung kontrovers diskutiert wird, veranschaulicht die zuständige Klimamanagerin das optimierte Gesamtsystem im Soll-Zustand und vergleicht es in mehreren Szenarien mit dadurch substituierten Systemen im IST-Zustand. Aus Gründen der Übersichtlichkeit stellt sie nur die wesentlichen stofflichen und keine energetischen Aufwände dar.

Gesamt-System im Soll-Zustand

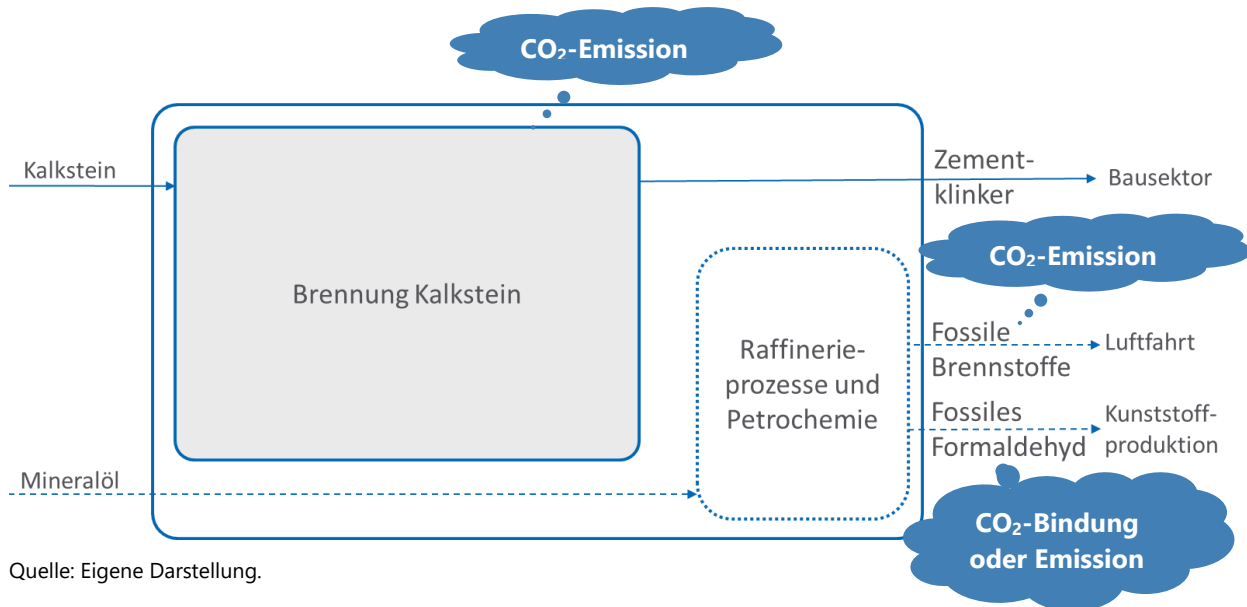
Abbildung 8: Nutzen-Aufwand-Schema: Zementklinkerherstellung mit CO₂-Verwertung



Im Soll-Zustand umfasst das Gesamtsystem die Zementproduktion und den betrachteten Verwertungspfad für das abgeschiedene CO₂. Der Nutzen des Gesamtsystems besteht im Zementklinker und in der Bereitstellung von E-Fuels für die Luftfahrt und synthetischem Formaldehyd für die Produktion thermoplastischer Kunststoffe. Den klimarelevanten Aufwand stellt der Kalkstein dar, aus dem der Kohlenstoff herausgelöst und abgeschieden wird. Je nach Pfad der Weiterverarbeitung wird er nach kurzer Zeit im Zuge der Verbrennung von E-Fuels wieder emittiert oder in Kunststoffen stofflich gebunden. Bei einem vollständigen Recyclingzyklus kann die Bindung in Kunststoffen lange anhalten. Die CO₂-Emissionen treten bei der Abfallverbrennung auf – wenn das CO₂ nicht erneut abgeschieden und in einen neuen Verwertungszyklus überführt wird. Bei vollständigen Recyclingkreisläufen würde sich die Menge an Material, in dem CO₂ gebunden ist, stetig erhöhen, da stetig neues CO₂ hinzukommt.

Gesamt-System im Referenz-Zustand

Abbildung 9: Nutzen-Aufwand-Schema: Zementklinkerherstellung ohne CO₂-Verwertung



Quelle: Eigene Darstellung.

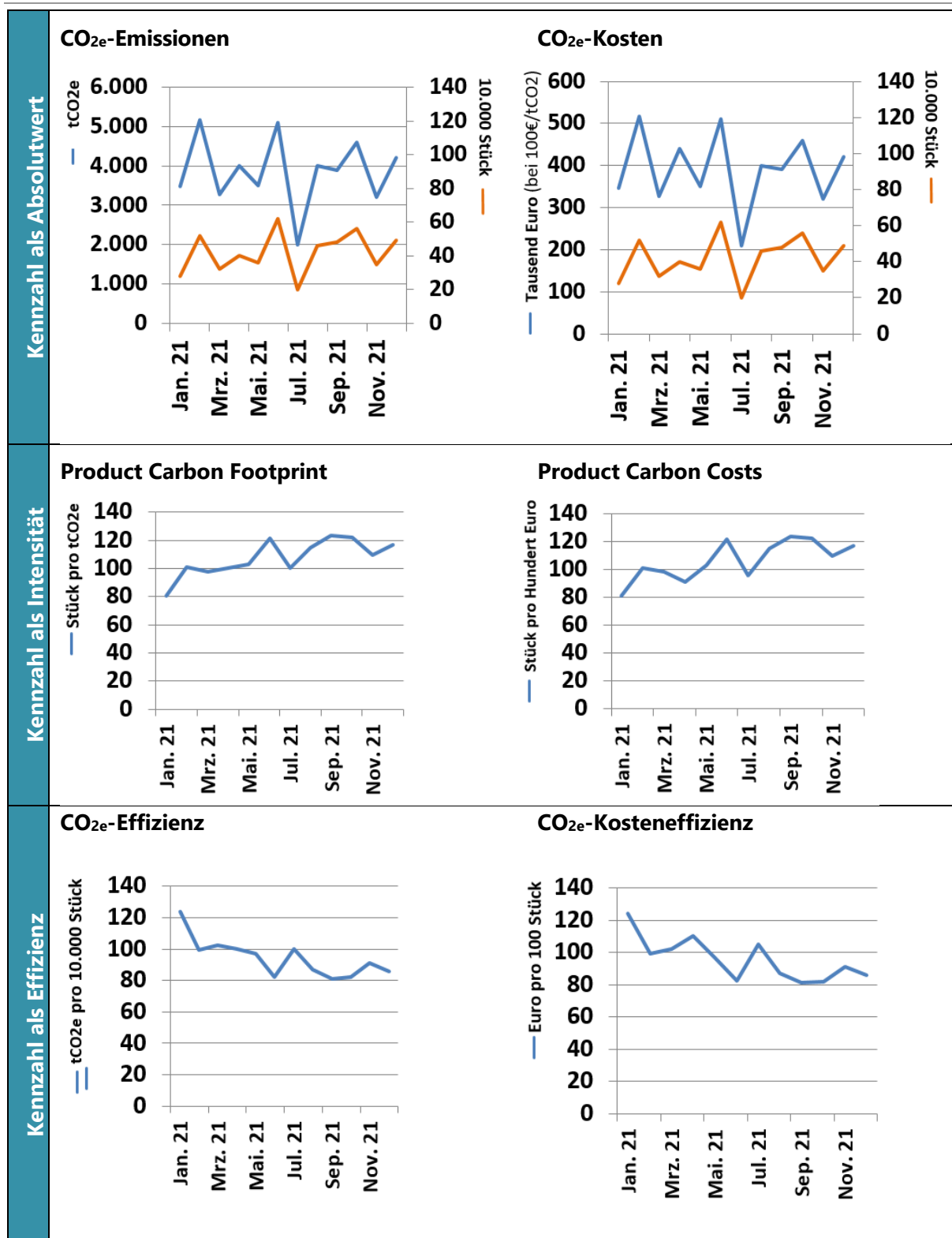
Um die Einspareffekte durch die innovative Produktion von Zementklinker bestimmen zu können, muss die Klimamanagerin ein Referenz-System definieren, das durch die Dekarbonisierungsmaßnahme substituiert wird. Die Systemgrenzen müssen so zugeschnitten sein, dass sich das System im Referenzzustand durch das System im Soll-Zustand vollständig ersetzen lässt. Die Klimamanagerin zieht die Systemgrenzen im Referenz-Zustand daher so, dass sich die durch den Soll-Zustand substituierten Stoffe als Nutzen ergeben. Sie geht von einem vollständig „fossilen“ Szenario aus.

Aus den Abbildungen ist offensichtlich, dass die Dekarbonisierungsmaßnahme in einem fossilen Substitutionsszenario zu einer Senkung an CO₂-Emissionen in Höhe der abgeschiedenen Menge CO₂ führt. Das abgeschiedene CO₂ wird je nach Verwertung kurzfristig oder nach stofflicher Bindung emittiert, jedoch ersetzt es in derselben Menge CO₂ aus mineralölbasierten Produkten. Werden die Emissionen des abgeschiedenen CO₂ ausschließlich auf die Nebennutzen e-Fuels und Formaldehyd verteilt, zugeteilt, kann sich für den Hauptnutzen Zementklinker ein Product Carbon Footprint von Null ergeben (siehe Allokationsverfahren für gekoppelte Nutzen in Annex III).

Bei den substituierten Stoffen handelt es sich jedoch nicht notwendigerweise dauerhaft um fossile Stoffe. Der Referenzzustand kann sich im Laufe der Zeit z. B. mit steigender Verfügbarkeit biogener Alternativen verändern. Wenn biogene Brennstoffe oder biogene Alternativen für Kunststoffe ersetzt werden, ist die Klimaschutzwirkung aufgehoben. Das Zementwerk sollte zur Aufrechterhaltung der CO₂-Vermeidungswirkung die Verwertungspfade im Laufe der Zeit anpassen um sicherzustellen, dass nur Stoffe mit fossilem CO₂ substituiert werden. Wenn in einem Zukunftsszenario keine solchen Stoffe mehr vorhanden sind, bleibt dem Zementwerk CCS als Alternative.

4.1.4.4 Visualisierungsbeispiele der Kennzahlen in der „Erfassung“

Abbildung 10: Visualisierungsbeispiele einer Auswahl an Kennzahlen



Quelle: Eigene Darstellung.

4.1.5 Monitoring von PCFs und PCCs: Vergleich mit der Baseline

4.1.5.1 Grundlagen

In Kapitel 3 haben wir die Kennzahlen bei einzelnen und vernetzten Systemen erfasst. Schon aus dieser Betrachtung heraus ergeben sich wertvolle Erkenntnisse für das Klimaschutzmanagement.

Beim **Monitoring** interessiert uns, wie erfolgreich wir mit unseren Maßnahmen am System sind, die CO_{2e}-Emissionen bei der Erzeugung des Nutzens zu verbessern und eine hohe Effizienz zu erhalten. Der direkte Vergleich absoluter CO_{2e}-Emissionen ist aufgrund sich ändernder Nutzengrößen nicht zielführend. Aber auch der direkte Vergleich der Product Carbon Footprints reicht für eine Betrachtung häufig nicht aus.⁷ Das hat vor allem den Hintergrund, dass wir nicht selbst alle Aspekte, welche die CO_{2e}-Emissionen eines Systems bestimmen, sinnvoll steuern können. Neben der Produktmenge können z. B. Witterung, Rohstoffqualitäten, Produkteigenschaften und Anforderungen an die Auftragsbearbeitung erheblichen Einfluss haben. In der Kennzahlenmethodik nennen wir diese erheblichen Einflüsse relevante **externe Einflussgrößen**. Wir möchten die Ergebnisse beim Monitoring um diese Einflussgrößen bereinigen, damit wir beurteilen können, welche Verbesserungen auf unsere Maßnahmen (technische Maßnahmen, Nutzerverhalten, Wartung etc.) zurückzuführen sind.

Wir formulieren und beantworten dafür die folgenden Fragestellungen:

- Welche und wie viele **Aufwände** wären im Monitoring-Zeitraum angefallen, wenn nicht das System in seinem aktuellen Zustand, sondern das System, so wie es im Referenzzeitraum beschaffen war, den im Monitoring-Zeitraum gemessenen Nutzen erzeugt hätte und dabei den im Monitoring-Zeitraum gemessenen, externen Einflussgrößen ausgesetzt gewesen wäre?

Die **Vergleichsaufwände** ($A_{Baseline}$), die das System – wie es im Referenzzeitraum beschaffen war – im Monitoringzeitraum verursacht hätte, **modellieren** wir z. B. mit Regressionsstatistik.⁸

- Welche Größen hätten sich für die **Kennzahlen** (z. B. Product Carbon Footprints, Product Carbon Costs) des Systems im Monitoring ergeben?

Diese **Vergleichs-Kennzahlen** berechnen wir wie in Kapitel 3 erläutert. Der Unterschied besteht lediglich darin, dass wir anstatt der **gemessenen Aufwände** (**A**) des zu monitorierenden Systems die **Vergleichsaufwände** des zu monitorierenden Systems ($A_{Baseline}$) in die dort genannten Formeln einsetzen.

Beispiele für Auswertungen

$$\text{Gütegrad [\%]} = \frac{\text{CO}_2 \text{ Emissionen}_{Ist-Werte}}{\text{CO}_2 \text{ Emissionen}_{Baseline}}$$

$$\text{Unterschied} = \text{CO}_2 \text{ Emissionen}_{Ist-Werte} - \text{CO}_2 \text{ Emissionen}_{Baseline}$$

$$\text{Unterschied [\%]} = \left(\frac{\text{CO}_2 \text{ Emissionen}_{Ist-Werte}}{\text{CO}_2 \text{ Emissionen}_{Baseline}} - 1 \right) * 100$$

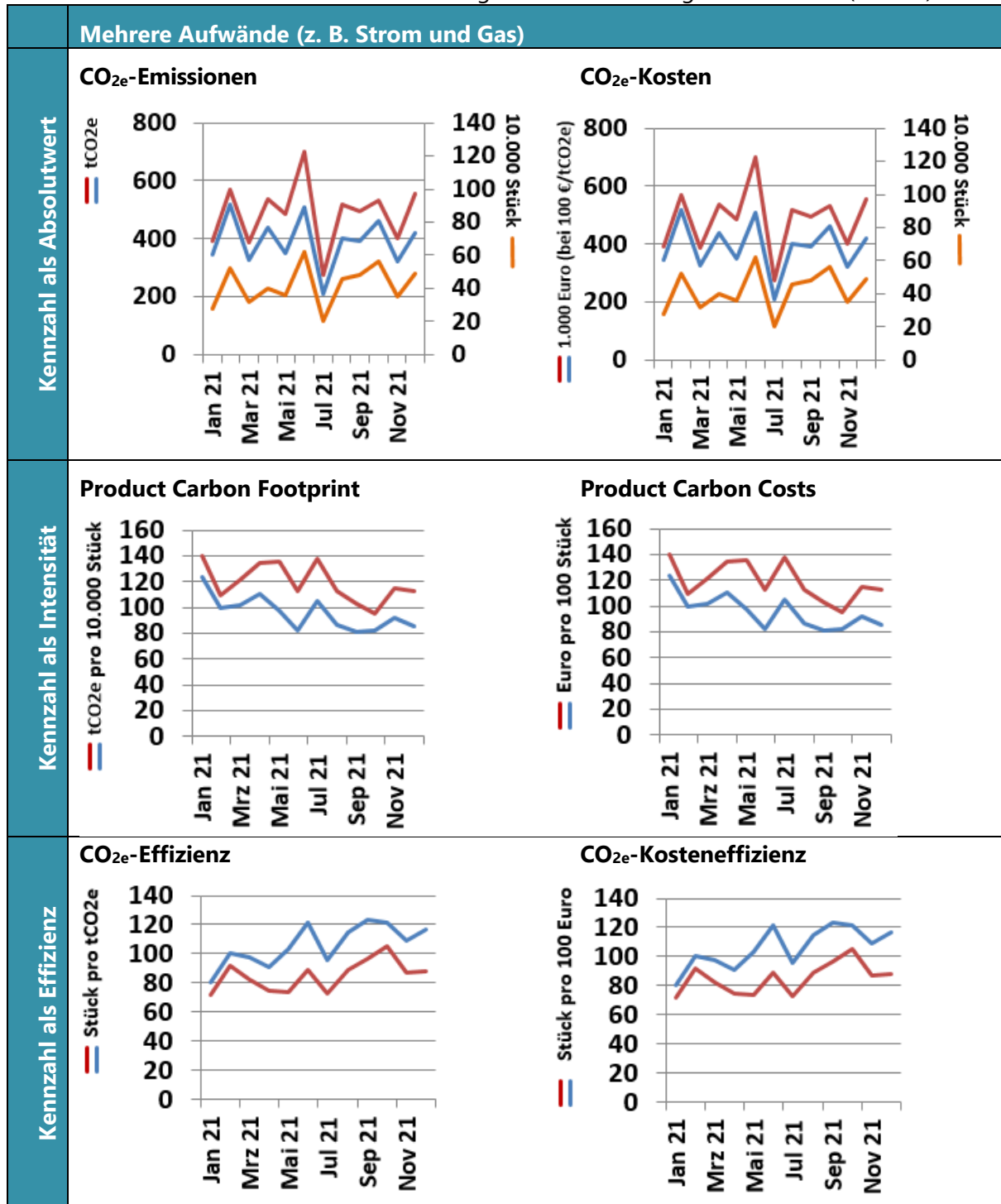
⁷ Bei einer tiefgreifenden Dekarbonisierungsmaßnahme, die prozessbezogene CO_{2e}-Emissionen umfassend reduziert, liefert ein Vergleich der Product Carbon Footprints vor und nach der Dekarbonisierungsmaßnahme eine i.d.R. ausreichende Evaluation zur Wirksamkeit. Im Anschluss ist für die dekarbonisierte Technik ein genaueres Monitoring nötig, um ihre Effizienz zu überwachen und fortlaufend zu verbessern.

⁸ Die grundlegende Herangehensweise für die Modellierung ist in Annex I beschrieben. Da es sich hier um Standardverfahren der Statistik handelt, gehen wir darauf nicht dezidiert ein. Es ist das wichtigste Anwenderwissen beschrieben. Die Modellbildung selbst erfolgt mittels Software.

4.1.5.2 Visualisierungsbeispiele der Kennzahlen im „Monitoring“

Abbildung 11: Visualisierungsbeispiel der Kennzahlen

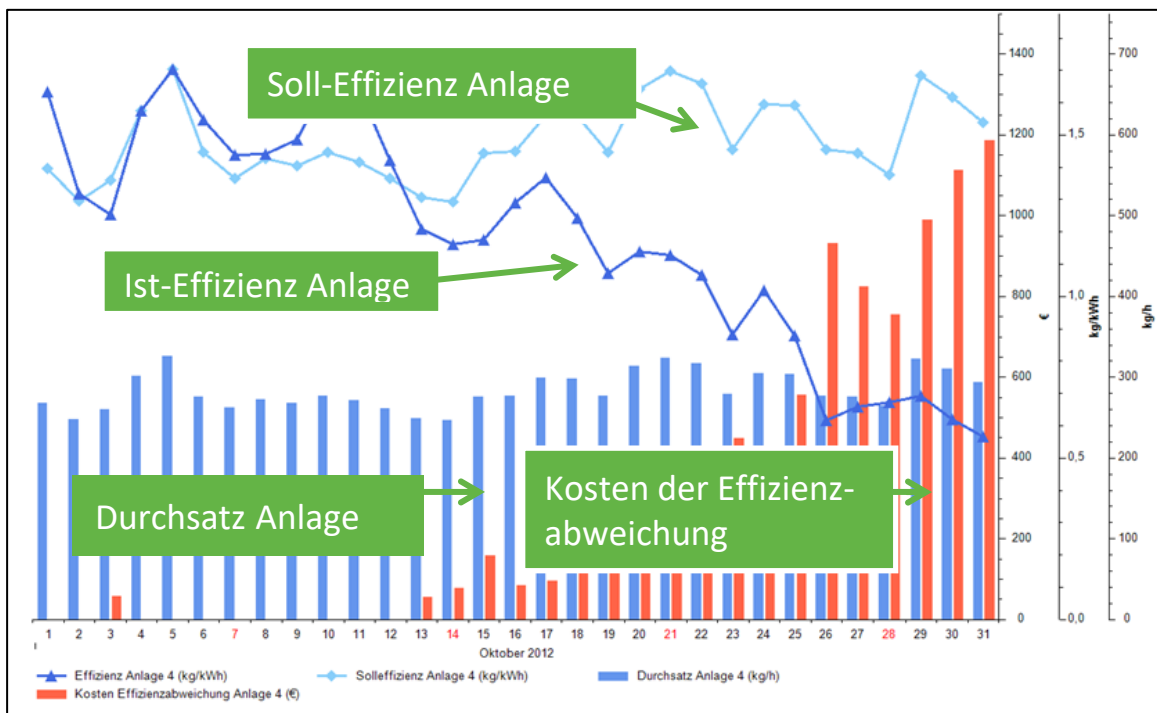
- aktuelle Ist-Werte der Kennzahlen -Vergleichs-Kennzahlen gemäß Baseline (Modell)



Quelle: Eigene Darstellung.

4.1.5.3 Beispiel für Monitoring: Effizienzüberwachung mit Frühwarnung

Abbildung 12: Effizienzüberwachung mit Frühwarnung



Monitoring können Sie etwa für Effizienzüberwachung nutzen und Frühwarnsysteme aufbauen, die z. B. das Controlling bei Einbruch der Effizienz eines Systems alarmiert. Die Abbildung zeigt einen solchen Fall: Bei einer Wartung Mitte Oktober 2021 wurde die Regelung einer Anlage verstellt, so dass in den Folgetagen die Effizienz einbrach. Die Information darüber wurde in Euro „Kosten der Effizienzabweichung“ aufbereitet, um den Adressaten im Controlling für den Handlungsbedarf zu sensibilisieren. Die automatische Warnung kann beispielsweise per E-Mail erfolgen. Ohne Effizienzüberwachung mit Frühwarnsystemen kann falsch eingestellte Regeltechnik lange unbemerkt bleiben und zu erheblichen zusätzlichen Kosten und CO_{2e}-Emissionen führen.

Anwendungsmöglichkeiten beim Monitoring sind beispielsweise

- Effizienz in Realtime überwachen und Frühwarnsysteme aufbauen
- Verbesserung bei CO₂-Emissionen nachweisen
- Anlagen vorausschauend und bedarfsabhängig Warten (Predictive Maintenance)
- Erfolge beim Klimaschutz verlässlich auswerten

4.1.6 Benchmarking von PCFs und PCCs: Vergleich mehrerer Systeme

4.1.6.1 Grundlagen

In Kapitel 4 haben wir die Kennzahlen eines Systems im Vergleich zur Baseline betrachtet.

Der Begriff „Benchmark“ geht ursprünglich auf die Marke in der Werkbank (Bench) zurück, die für die Messung der Größe eines Werkstücks verwendet wurde. Im Klimaschutzmanagement kann Benchmarking dazu genutzt werden, Verbesserungspotenziale zu bestimmen oder eine CO₂-Reduktion gegenüber einer verbreiteten Bestandstechnik darzustellen. Im erstgenannten Fall dient ein besonders effizientes System und im letztgenannten Fall eine verbreitete Standardtechnik als Benchmark. Damit Benchmarking belastbare Ergebnisse liefert ist es wichtig, dass das Vergleichssystem, das als Benchmark herangezogen wird, einen vergleichbaren Nutzen produziert und vergleichbaren externen Einflussgrößen ausgesetzt ist. Auch der Wertebereich, der Nutzen und externe Einflussgrößen müssen vergleichbar sein.

Die Fragestellungen lauten beim Benchmarking:

- Welche und wie viele **Aufwände** wären im Benchmarking-Zeitraum angefallen, wenn nicht das betrachtete System am Standort, sondern ein anderes System den im Bewertungszeitraum gemessenen Nutzen erzeugt hätte und dabei den im Bewertungszeitraum gemessenen, externen Einflussgrößen ausgesetzt gewesen wäre?

Das andere System, mit dem verglichen werden soll, ist entweder schon bekannt, oder es wird im Benchmarking ermittelt. Die **Vergleichsaufwände** ($A_{\text{Benchmark}}$), die es verursacht hätte, **modellieren** wir z. B. mit Regressionsstatistik.⁹

- Welche Größen hätten sich für die **Kennzahlen** (z. B. Product Carbon Footprints, Product Carbon Costs) des Systems im Benchmarking ergeben?

Diese **Vergleichs-Kennzahlen** ermitteln wir wie in Kapitel 3 beschrieben. Der Unterschied besteht lediglich darin, dass wir anstatt der gemessenen Aufwände (**A**) des zu benchmarkenden Systems die **Vergleichsaufwände** ($A_{\text{Benchmark}}$) in die dort genannten Formeln einsetzen.

Die Visualisierungsmöglichkeiten sind analog zu denen im Monitoring (Kapitel 4). Zusätzlich können Diagramme dargestellt werden, in denen modellierte Vergleichskennzahlen mehrerer Systeme (mehrere Benchmarks) hinterlegt sind.

Beispiele für Auswertungen

$$\text{Gütegrad [\%]} = \frac{\text{CO}_2 \text{ Emissionen}_{\text{Ist-Werte}}}{\text{CO}_2 \text{ Emissionen}_{\text{Benchmark}}}$$

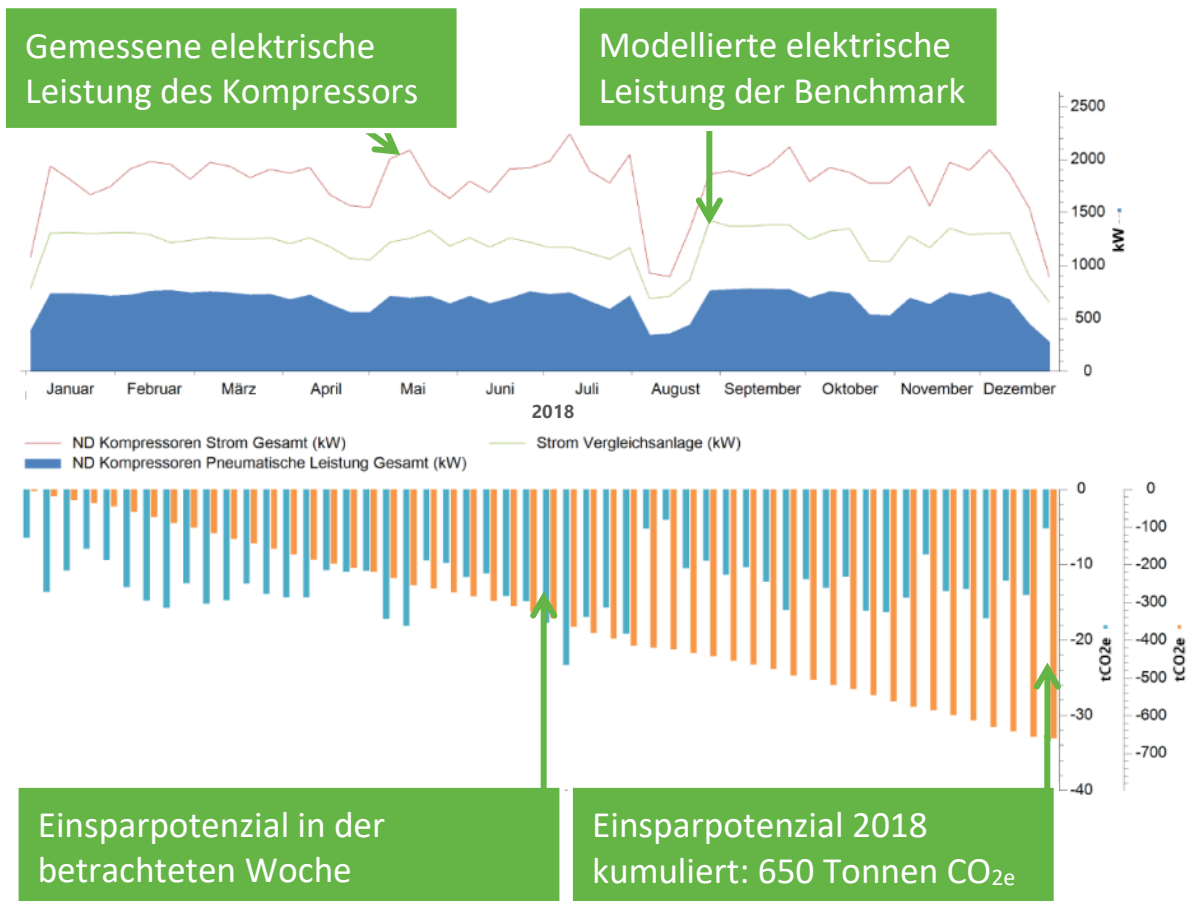
$$\text{Unterschied} = \text{CO}_2 \text{ Emissionen}_{\text{Ist-Werte}} - \text{CO}_2 \text{ Emissionen}_{\text{Benchmark}}$$

$$\text{Unterschied [\%]} = \left(\frac{\text{CO}_2 \text{ Emissionen}_{\text{Ist-Werte}}}{\text{CO}_2 \text{ Emissionen}_{\text{Benchmark}}} - 1 \right) * 100$$

⁹ Die grundlegende Herangehensweise für Benchmarking und die Modellierung der Benchmark-Aufwände ist in Annex II beschrieben. Da es sich um Standardverfahren der Statistik handelt, gehen wir auf diese Verfahren nicht dezidiert ein. Es ist dort nur das wichtigste Anwenderwissen beschrieben. Die Modellbildung selbst erfolgt mittels Software.

4.1.6.2 Beispiel für Effizienz-Bewertung: Benchmarking von Kompressoren

Abbildung 13: Effizienzbewertung: Benchmarking von Kompressoren



Beim Benchmarking nehmen wir einen Anlagenvergleich vor. Einsparpotenziale einer effizienten Technik, deren Betriebsverhalten wir kennen, können wir im Ergebnis nutzerorientiert veranschaulichen. Die Abbildung zeigt das Einsparpotenzial eines Systems „Kompressoren“ bei der Verwendung effizienter Kompressoren gegenüber den Bestandsanlagen. Da sich der Adressat der Information im Nachhaltigkeitsmanagement befindet, sind die Einsparpotenziale in tCO_{2e} ausgedrückt.

Anwendungsmöglichkeiten bei der Bewertung sind z. B.

- Vermeidungspotenziale mittels Benchmarking mit anderen Anlagen quantifizieren
- CO_{2e}-Emissionen und –Kosten alternativer Produktion an eigenem Standort simulieren
- Die Effizienz der Produkterstellung im Vergleich mit Bestanlagen absolut einschätzen

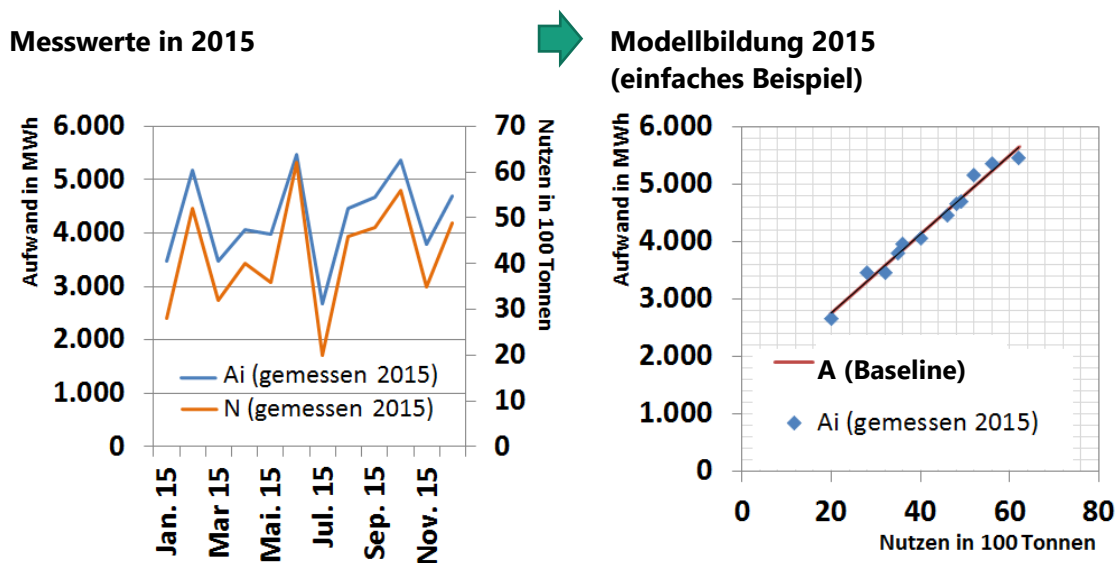
4.1.7 Annex I: Modellierung für das Monitoring

Dieser Annex gibt Hintergrundinformationen, wie Effizienz-Controllingsoftware bzw. Statistiksoftware den Aufwand $A_{Baseline}$ des Vergleichssystems für das Monitoring ermittelt. Je nach eingesetz-

ter Lösung unterscheiden sich die verwendeten statistischen Ansätze (z. B. parametrische Regression, nicht-parametrische Regression). Auf Vor- und Nachteile der Ansätze gehen wir hier nicht ein, bei Bedarf können sie in einschlägiger Literatur zu Statistik nachgelesen werden. Wir möchten nur auf die grundlegenden Rechenoperationen hinweisen.

- Schritt 1: Ermittlung eines statistischen Zusammenhangs zwischen Aufwand, Nutzen und relevanten externen Einflussgrößen

Abbildung 14: Ermittlung eines statistischen Zusammenhangs zwischen Aufwand, Nutzen und relevanten externen Einflussgrößen



Modell (hier einfaches Beispiel, linear, nur mit Nutzen):

$$A \text{ (Baseline) [MWh]} = 69 \text{ [MWh/100 t]} * \text{Nutzen [100 t]} + 1390 \text{ MWh}$$

Quelle: Eigene Darstellung.

Effizienzcontrolling-Software ermittelt mittels Regressionsanalyse auf Basis kontinuierlicher Messreihen denjenigen funktionalen Zusammenhang, der den gemessenen Aufwand im Referenzzeitraum durch den gemessenen Nutzen und die gemessenen externen Einflussgrößen am treffendsten erklärt. Dieses resultierende Modell steht repräsentativ für das System, wie es im Referenzzeitraum beschaffen war.

- Schritt 2: Prüfung der Qualität und Festlegung der Baseline

Um die Genauigkeit des statistischen Zusammenhangs überprüfen zu können, gibt die Software **statistische Prüfwerte** (MAPE, R^2 , Signifikanz etc.) und graphische Prüfungen aus. Ist die Genauigkeit gering, kann das z.B. den Grund haben, dass wir relevante externe Einflussgrößen erst noch erfassen müssen oder ihre Wirkungsweise linearisieren müssen. Es kann aber auch den Grund haben, dass Messgeräte falsche Werte liefern und repariert werden müssen. Genügt die Genauigkeit den Anforderungen, legen wir den statistischen Zusammenhang als „**Baseline-Funktion**“ fest.

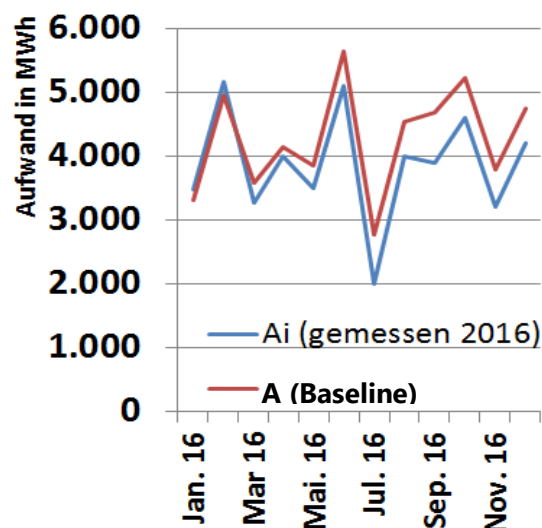
- Schritt 3: Auswertung der Effizienzveränderungen

Im Zuge des Monitorings werden die aktuell gemessenen Werte für Nutzen und die aktuell gemessenen Werte für relevante externe Einflussgrößen in die Baseline eingesetzt. Dadurch modelliert die Effizienz-Controllingsoftware den Aufwand A_{Baseline} , der entstanden wäre, wenn das System, so wie es im Referenzzeitraum beschaffen war, den aktuell gemessenen Nutzen erzeugt hätte und dabei den aktuell gemessenen, relevanten externen Einflussgrößen ausgesetzt gewesen wäre. Wichtig ist

dabei, dass der Wertebereich, in denen Nutzen und externe Einflussgrößen im Monitoring-Zeitraum schwanken, in etwa derselbe ist wie der Wertebereich im Referenzzeitraum.

Die Vergleichsaufwände $A_{Baseline}$ werden anschließend jeweils in die Formeln zur Berechnung der Vergleichs-Kennzahlen eingesetzt, wie in Kapitel 4 und 3 aufgeführt.

Abbildung 15: Auswertung der Effizienzveränderungen



Quelle: Eigene Abbildung.

Hinweis: Gute statistische Prüfwerte sind nicht immer ein Garant dafür, dass alle relevanten externen Einflussgrößen wirklich berücksichtigt sind. Es kann auch bedeuten, dass sie im Referenzzeitraum zwischen den Messintervallen nicht variiert haben und daher nicht als Einfluss sichtbar geworden sind. Das kann im Monitoring zu Problemen führen, wenn sie plötzlich andere Werte annehmen. **Beispiel:** Eine PET-Flaschenanlage produziert im Baseline-Zeitraum von Messintervall zu Messintervall immer dieselben Anteile großer und kleiner Flaschen. Aufgrund der konstanten Anteile wird ein Modell gute statistische Prüfwerte annehmen, auch wenn die Flaschenart nicht als relevante externe Einflussgröße berücksichtigt wird. Verschieben sich aber im Monitoring-Zeitraum die Anteile hin zu einer verstärkten Produktion großer Flaschen, so würde der Vergleich des Aufwands mit der Baseline plötzlich einen Mehrverbrauch signalisieren. **Lösung:** Kürzere Messintervalle helfen, die Variationen externer Einflussgrößen zu erfassen und in der Statistik abzubilden.

4.1.8 Annex II: Modellierung für das Benchmarking

Dieser Annex gibt Hintergrundinformationen, wie Effizienz-Controllingsoftware bzw. Statistiksoftware den Aufwand $A_{Benchmark}$ des Vergleichssystems für Effizienz-Benchmarks ermittelt. Beim Benchmarking ist das Vorgehen ähnlich wie beim Monitoring. Der Unterschied besteht darin, dass das Vergleichssystem nicht dasselbe System ist (so wie es sich im Baseline-Zeitraum verhalten hat) – sondern ein vergleichbares, anderes System.

Ermittlung des Benchmarks aus dem Benchmarking selbst

- Schritt 1: Definition der Benchmarking-Gruppen

Analyse der gelieferten Datensätze zu den Systemen auf Vergleichbarkeit mit dem Ziel, Benchmarking-Gruppen festzulegen. Systeme, die vergleichbaren Nutzen (vgl. dazu auch den Begriff der funktionalen Einheit) erzeugen, von vergleichbaren Fertigungstiefen ausgehen und vergleichbaren Einflussgrößen ausgesetzt sind, können in Benchmarking-Gruppen zusammengefasst werden.

- Schritt 2: Berechnung von Regressionsmodellen und Prüfwerte für jedes System

Für jedes System innerhalb der Benchmarking-Gruppe wird mittels Regressionsanalyse derjenige statistische Zusammenhang gesucht, der den Aufwand des Systems durch die aufgetretenen Werte der Nutzen und relevanten externen Einflussgrößen am treffendsten erklärt. Zur Qualitätsbewertung werden statistische Prüfwerte ausgewertet (MAPE, R^2 , Signifikanz etc.) und graphische Prüfverfahren angewendet. Modelle, die den Qualitätsanforderungen nicht standhalten, werden nicht als Benchmark verwendet.

- Schritt 3: Ermittlung der Benchmarks für die Systeme

Im dritten Schritt wird für jedes betrachtete System überprüft, welches der Regressionsmodelle der Systeme innerhalb der Benchmarking-Gruppe in Abhängigkeit von Nutzen und relevanten Einflussgrößen des betrachteten Systems den niedrigsten Aufwand ausweist. Das System mit dem niedrigsten modellierten Aufwand ist das Benchmark-System. Den Aufwand, den das Benchmark-System ausweist, bezeichnen wir als $A_{\text{Benchmark}}$

Die Vergleichsaufwände $A_{\text{Benchmark}}$ werden anschließend jeweils in die Formeln zur Berechnung der Vergleichs-Kennzahlen eingesetzt, wie in Kapitel 5 und 3 aufgeführt.

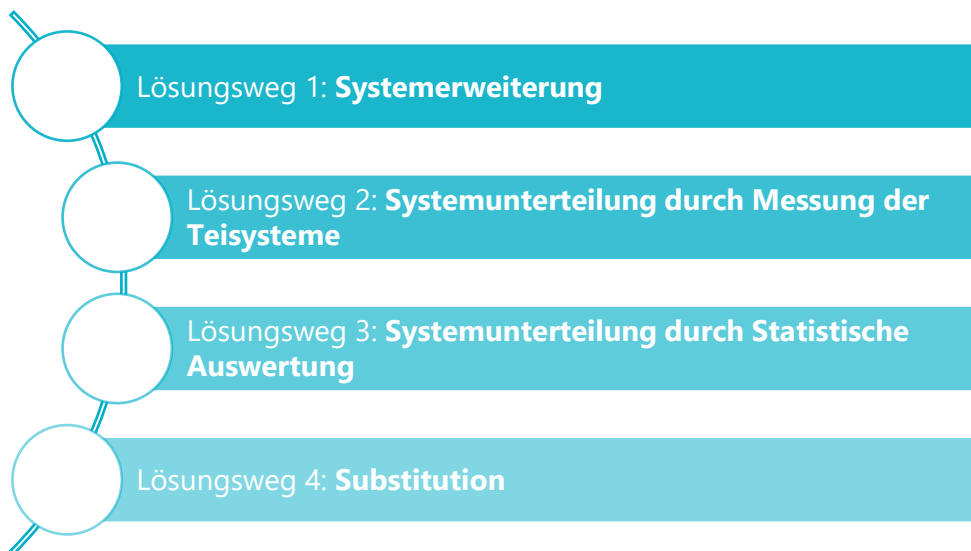
Alternativ: Nutzung eines bereits bekannten Benchmarks

Der Benchmark muss nicht zwangsläufig in einem eigens durchgeführten Benchmarking neu ermittelt werden. Manchmal ist das System, das als Vergleichssystem (Benchmark-System) verwendet werden soll, bereits von Anfang an bekannt. In diesem Fall kann das Regressionsmodell dieses Vergleichssystems direkt zur Ermittlung des Benchmark-Aufwands $A_{\text{Benchmark}}$ herangezogen werden.

4.1.9 Annex III: Umgang mit Systemen mit mehreren Nutzen

Produziert ein System mehr als einen Nutzen, können die Aufwände den Nutzen nicht direkt zugeordnet und deshalb die Bewertungsfaktoren der Nutzen nicht unmittelbar ermittelt werden. Für die Betrachtung und Vernetzung der Systeme ist aber die Berechnung eines Bewertungsfaktors für jeden Nutzen nötig. Grundsätzlich besteht zur Lösung dieses Problems die Wahl zwischen Systemerweiterung (Lösungsweg 1), Systemunterteilung (Lösungswege 2, 3) sowie dem Heranziehen substituierter Systeme.

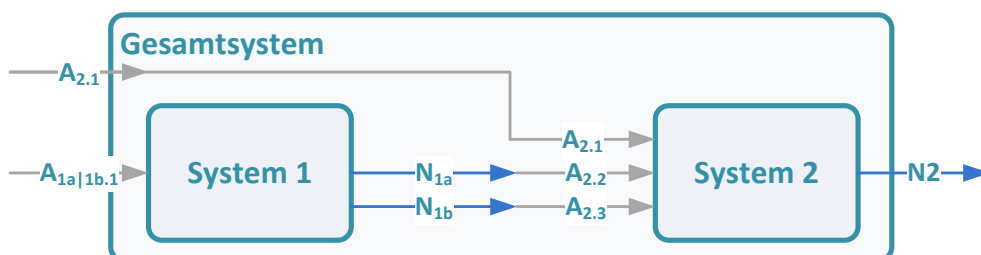
Abbildung 16: Lösungsansätze bei mehreren Nutzen:



Quelle: Eigene Abbildung.

Lösungsweg 1: Umgehung des Problems durch Systemerweiterung

Abbildung 17: Systemerweiterung¹⁰



Quelle: Eigene Abbildung.

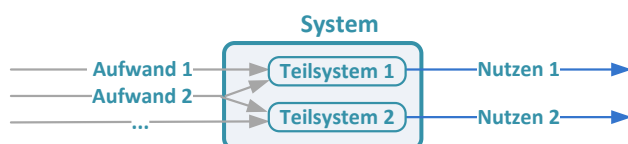
Am einfachsten kann das Problem gelöst werden, wenn es durch Systemerweiterung umgangen wird. Bei der Systemerweiterung wird ein Gesamtsystem mit einem Nutzen gebildet, so dass N_{1a} und N_{1b} nicht mehr betrachtet werden müssen. Nachteil dieser Methode ist dabei, dass Aussagen dann nur noch für das Gesamtsystem und nicht mehr für die einzelnen Systeme möglich sind.

¹⁰ Die Nomenklatur zur Erläuterung der Abkürzungen finden Sie in Kapitel 3.1

Lösungswege 2 und 3: Ermittlung der Bewertungsfaktoren durch Unterteilung

Die andere Variante ist, das System, das mehrere Nutzen erzeugt, in Teilsysteme zu zerlegen, damit diese jeweils nur einen Nutzen aufweisen. Die Abbildung zeigt diese Systemunterteilung. In der Abbildung wird der Aufwand 2 aufgeteilt und für die Teilsysteme getrennt ermittelt.

Abbildung 18: Systemunterteilung



Quelle: Eigene Abbildung.

Lösungsweg 2: Systemunterteilung auf Basis von Messung

Sofern der Kostenaufwand für die erforderlichen Messungen in einem guten Verhältnis zum Energieverbrauch des Systems steht, sollte die Unterteilung durch direkte Messung der Teilaufwände erfolgen. In der Abbildung würde dabei der Aufwand 2 (z. B. Strom) am Teilsystem 1 und am Teilsystem 2 getrennt gemessen. Damit lassen sich die Bewertungsfaktoren wie gehabt berechnen.

Lösungsweg 3: Systemunterteilung auf Basis statistischer Modelle

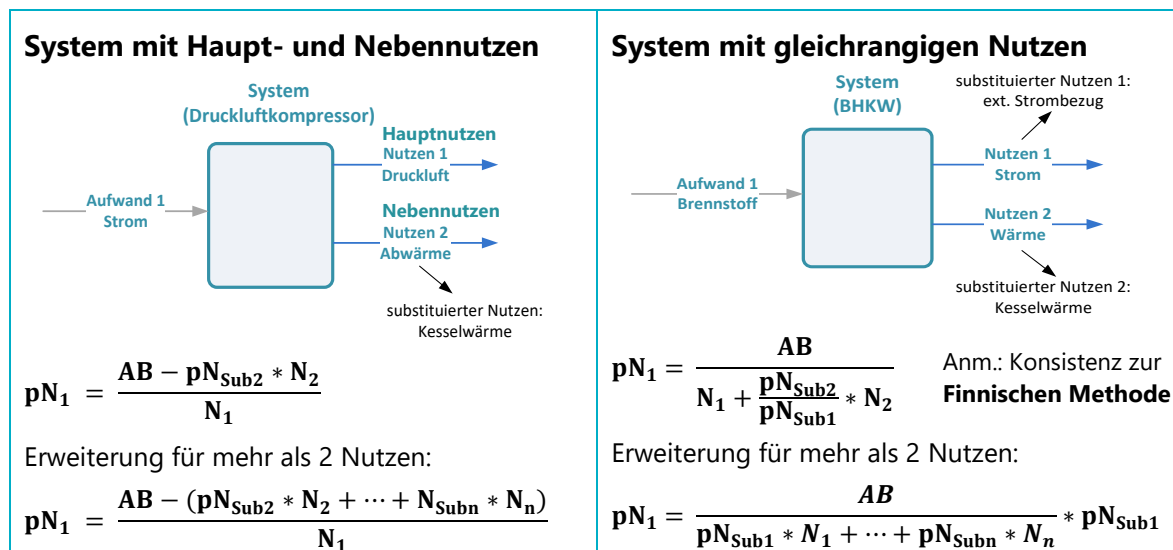
Mit Hilfe der statistischen Modellbildung kann der Aufwand 2 ebenfalls getrennt ermittelt werden. Diese Methode ist dem Lösungsweg 2 in der Genauigkeit unterlegen. Auch bei statistischer Ermittlung der Verteilung des Aufwands 2 lassen sich Bewertungsfaktoren wie gehabt berechnen.

Lösungsweg 4: Ermittlung anhand Bewertungsfaktoren substituierter Nutzen

Für Systeme, die mehrere Nutzen gekoppelt erzeugen, sind die Lösungswege 1, 2 und 3 oft nicht anwendbar. In diesem Fall können die Bewertungsfaktoren anhand bekannter Bewertungsfaktoren substituierter Nutzen ermittelt werden. Ist ein Hauptnutzen identifizierbar, werden die Bewertungsfaktoren der substituierten Nebennutzen herangezogen um seinen Bewertungsfaktor zu bestimmen. Sind die Nutzen gleichrangig, erfolgt die Bestimmung am Verhältnis des bewerteten zum substituierten bewerteten Aufwand.¹¹ Die Verfahren lassen sich auch untereinander kombinieren.

¹¹ Dieses Vorgehen liefert die gleichen Ergebnisse wie die „Finnische Methode“, die ebenfalls auf substituierte Referenzsysteme Bezug nimmt und z. B. im Kohlendioxidkostenaufteilungsgesetz angewendet wird. Das hier beschriebene Vorgehen ist in der Formelgestaltung jedoch auf die direkte Ermittlung von Bewertungsfaktoren (CO₂-Faktoren, Energiepreisen, Primärenergiefaktoren etc.) bei gleichrangigen gekoppelten Nutzen optimiert und dabei auch für mehr als 2 gleichrangige gekoppelte Nutzen anwendbar.

Abbildung 19: Systeme mit gekoppelten Nutzen¹²



Quelle: Eigene Abbildung.

4.1.10 Annex IV: Kalkulatorische Kosten für CO₂: Dekarbonisierung in der Kosten- und Leistungsrechnung verankern

In Kapitel 3.1 wurde anhand eines Beispiels veranschaulicht, wie Unternehmen kalkulatorische Kosten bei CO_{2e} in die Investitionsbewertung einbeziehen können. Viele Unternehmen der Industrie haben sich bereits ehrgeizige Klimaneutralitätsziele gesetzt. Um die ambitionierten Zeitpläne zu halten, müssen sie in kurzer Zeit zahlreiche Maßnahmen umsetzen. Gleichzeitig gibt es in Unternehmen klare wirtschaftliche Anforderungen, ob Maßnahmen genehmigt werden. Klimaschutzmaßnahmen erreichen diese Anforderungen häufig nicht. Maßnahmen beim Einkauf verursachen bei aktuellen Preisen sogar Mehraufwände. Um Klimaschutzmaßnahmen strukturiert und fundiert voranzutreiben, bieten sich kalkulatorische Kosten als strategisches Managementinstrument an.

Kalkulatorische Kosten für CO_{2e}

- Kalkulatorische Kosten in der Kosten- und Leistungsrechnung (KLR)

Kalkulatorische Kosten kommen in der KLR zur Anwendung, wenn eigentlich anfallenden Kosten keine Zahlungsströme in derselben Höhe gegenüberstehen. Klassische Fälle sind kalkulatorische Mietkosten, die nur in geringerer Höhe (Anderskosten) oder bei Immobilieneigentum gar nicht zahlungswirksam werden (Zusatzkosten). Andere Beispiele sind nicht ausgezahlte Unternehmerlöhne. Kalkulatorische Kosten haben den Zweck, über nicht-zahlungswirksame Kostenaufschläge die Lücke zwischen den eigentlich entstehenden Kosten für das Unternehmen und den tatsächlichen Zahlungen zu füllen. Sie dienen Investitionsentscheidungen und der Preisgestaltung.

¹² Die Nomenklatur zur Erläuterung der Abkürzungen finden Sie in Kapitel 3.1; Unterschiede zwischen den Nutzengrößen und durch sie substituierte Nutzengrößen können im Bewertungsfaktor der substituierten Nutzen berücksichtigt werden, etwa als: $pN_{Sub1.adjustiert} = pN_{Sub1} * N_{Sub1}/N_1$

- Kalkulatorische Kosten für CO_{2e} als strategisches Steuerungsinstrument

CO_{2e} -Emissionen bringen hohe Kosten für die Umwelt mit sich. Wenn Sie sich im Unternehmen die Klimaneutralität als Ziel gesetzt haben ist es folgerichtig, wenn Sie ihre Einschätzung der Umweltschäden durch CO_{2e} als kalkulatorische Kosten einbeziehen. Mit diesem Instrument werden Sie ihrer Klimastrategie in die Kosten- und Leistungsrechnung gerecht. Sonderregelungen für Klimaschutzmaßnahmen in der Investitionsrechnung machen Sie damit überflüssig. Bewährte Entscheidungskriterien können Sie unverändert beibehalten. Bei der Preiskalkulation gilt es abzuwägen, ob Sie die Kosten weiterreichen und zur Finanzierung von Klimaschutz einsetzen können.

Kalkulatorische Kosten für CO_{2e} in Investitionsbewertung und Preisen

- Schritt 1: Kalkulatorische Kosten für CO_{2e} festlegen

Im ersten Schritt legen Sie die Höhe der kalkulatorischen Kosten für CO_{2e} selbst fest. Eine Orientierung zur angemessenen Höhe bietet das Umweltbundesamt mit den „UBA-Empfehlungen zu den Klimakosten“. Bei einem Fokus auf die Effekte auf heutige Generationen nennt das UBA ca. 200 Euro pro Tonne CO_{2e}. Bei einer Einbeziehung der Schäden für künftige Generationen empfiehlt das UBA eine Kalkulation mit 700 Euro pro Tonne CO_{2e}.

- Schritt 2: Reale Zahlungsströme für CO_{2e} ermitteln

Fällt Ihr Unternehmen nicht unter die Regelungen der Strompreiskompensation und Carbon Leakage Verordnung, leistet es reale Zahlungen für CO_{2e} -Emissionen als Bestandteil der Energiepreise. Die Stromerzeugung ist im ETS emissionshandlungspflichtig. Für Emissionsrechte fallen aktuell (Dez. 2022) Zahlungen in Höhe von ca. 80 Euro pro Tonne CO_{2e} an. Bei Brennstoffen greift das BEHG i.H.v. 30 Euro pro Tonnen CO_{2e} (2022 und 2023). Zudem sind in den Preisen Ihrer Lieferanten bereits indirekt Zahlungen für CO_{2e} enthalten.

- Schritt 3: Unterschiede über kalkulatorische Kostenaufschläge ausgleichen

In der Terminologie der Kosten- und Leistungsrechnung sind Kalkulatorische Kosten für CO_{2e} „Anderskosten“ für Ihr Unternehmen, da ein Teil bereits zahlungswirksam ist. Ermitteln Sie die Differenz zwischen den bereits zahlungswirksamen Kosten und den kalkulatorischen Kosten für CO_{2e} und gleichen Sie die Unterschiede über kalkulatorische Kostenaufschläge aus. Diese kalkulatorischen Kostenaufschläge können Sie dann jeweils zu den real anfallen Kosten addieren.

- Schritt 4: Investitionsbewertungen nach etablierten Verfahren durchführen

Beziehen Sie bei Investitionsbewertungen die ermittelten kalkulatorischen Kostenaufschläge ein, erzielen Klimaschutzmaßnahmen dort höhere Kapitalwerte, höhere interne Verzinsungen und kürzere Amortisationszeiten. Die Auswertung ermöglicht Ihnen einen fundierten, strukturierten Vergleich mit Alternativinvestition. Die Genehmigung oder Ablehnung von Investitionen in Klimaschutz folgt den etablierten Bewertungsverfahren in Ihrem Unternehmen.

- Schritt 5: Berücksichtigung in den Produktpreisen sofern möglich

Häufig fließen kalkulatorische Kosten in die Preisgestaltung ein. Wenn Sie über Product Carbon Footprints verfügen, können Sie auf Basis der vorangegangenen Ergebnisse auch die kalkulatorischen Kosten bzw. Kostenaufschläge für CO_{2e} der Produkte berechnen und einpreisen. Allerdings gilt das immer unter der Limitierung, dass die erzielbaren Preise letztlich von Angebot und Nachfrage bestimmt werden. Für eine erfolgreiche Einpreisung braucht es Kunden, die bereit sind, die Kosten zur Vermeidung von Umweltschäden durch CO_{2e} -Emissionen der Produktbereitstellung zu tragen. Ist das nicht der Fall, können diese Preise nur als Schattenpreise geführt werden.

Klimaschutzverträge: Carbon Contracts for Difference

Das Prinzip der kalkulatorischen Kosten wird auch von den geplanten Klimaschutzverträgen („Carbon Contracts vor Difference“) aufgegriffen. Dort sollen Wettbewerbsnachteile klimafreundlicher Technologien unter Einbeziehung der Betriebskosten ausgeglichen werden. Das Instrument ist die Festlegung fiktiver Kostensätze für CO_{2e}, bei denen die klimafreundliche Technik genauso wirtschaftlich wäre wie die Referenztechnik. Die Förderung soll die Lücke zwischen diesen kalkulatorischen Kosten und den tatsächlich anfallenden Zahlungen für CO_{2e} füllen. Steigt der zahlungswirksame über den vertraglich vereinbarten kalkulatorischen CO_{2e} -Preis, sind entsprechend Rückzahlungen fällig.

4.1.11 Erkenntnisse

Im Verlauf des Vorhabens bestätigte sich, dass kein wesentlicher methodischer Anpassungsbedarf an der Kennzahlenmethodik notwendig ist, um anstatt von Energieaufwänden prozessbedingte und energiebedingte CO_{2e}-Emissionen in den Fokus zu nehmen.

Von besonderer Bedeutung sind die Erkenntnisse gerade auch für die Bilanzierung von CO_{2e} aus Carbon Capture and Utilisation (CCU) Verfahren. Die Kennzahlenmethodik bestätigt die Vorgehensweisen der DEHSt hinsichtlich der Weiterleitung von inhärentem CO_{2e} in Stoffströmen.

Hinsichtlich der Ermittlung von Einsparungen von CO_{2e} macht die Kennzahlenmethodik deutlich, dass die Substitutionswirkung die bestimmende Größe für die Ermittlung der CO_{2e} -Einsparungen ist

Die Ergebnisse dieses Methodendokuments waren Grundlage für die entstehenden Wegweiser bei den Unternehmen aus der energieintensiven Industrie.

Die Titel des neu entstandenen Leitfadens wurden mit Blick auf eine möglichst gute Nutzbarkeit in der Industrie angepasst.

4.2 Überblicksdokument zu den Herausforderungen bei der Modellierung komplexer Prozesse

Autoren: Grabowski, Knut; Ratjen, Georg

In diesem Überblicksdokument werden die drängendsten Handlungsbedarfe bei der Modellierung komplexer Industrieprozesse benannt.

4.2.1 Kennzahlenkataloge für verbreitete Prozesse

Die Identifizierung der bestimmenden Einflussgrößen von Prozessen stellt für Industrieunternehmen einen hohen Aufwand dar. Im Zuge der Entwicklung der Kennzahlenmethodik wurden für mehrere verbreitete Versorgungstechniken standardisierte Kataloge für Einflussgrößen entwickelt. Diese Kataloge sollten ausgeweitet werden, um den Aufwand zur Modellbildung für die Industrie zu senken (auch als Vorsorge für evtl. unternehmensübergreifendes Benchmarking von Prozessen). Einheitliche Kennzahlenkataloge sind für eine Vielzahl verbreiteter Branchentechniken möglich, z. B. Cleaning in Place Prozessen, Spritzgussverfahren. Branchentechnikbezogene Kennzahlenleitfäden könnten die fortlaufende Effizienzoptimierung deutlich beschleunigen und Doppelarbeit vermeiden.

4.2.2 Effizienz innerhalb eines Batches bestimmen

Bei Batch-Prozessen werden Produkte in Chargen gefertigt. Sie weisen keine kontinuierlichen Stoffströme auf. Unter diesen Gegebenheiten stellt die zeitliche Zuordnung von Aufwänden, Nutzen und externen Einflussgrößen zueinander eine deutlich komplexere Problemstellung als bei kontinuierlichen Prozessen dar. Beispielsweise werden häufig auf Produktionsanlagen verschiedene Produkttypen hergestellt. Ohne eine zeitliche Zuordnung der CO₂-Beiträge auf die verschiedenen Produkttypen kann kein Monitoring und keine Bewertung der Stoffströme und den damit verbundenen Kosten und CO₂-Emissionen erfolgen. Für Carbon Monitoring ist hierbei die Verknüpfung von vernetzten kontinuierlichen Stoff- und Energieströmen mit diskontinuierlichen Stoffketten erforderlich.

Als Lösungsansatz ist denkbar, die eingehenden Stoffe mit genauen Zeitstempeln zu versehen, so dass innerhalb der Bearbeitung eines Batches die Verweilzeiten mit in die Modellberechnung einfließen können. Durch diese Vorgehensweise könnte die Forderung nach Gleichzeitigkeit der bestimmenden Variablen eines Modells gewahrt werden. Ein weiterer Lösungsansatz ist die Probenentnahme im Rahmen bei Batch-Prozessen, wo dieses möglich ist. Dieser Ansatz wurde bei einem Industriepartner im Wegweiser skizziert.

Studien und Leitfäden, die eine Modellierung von Batch-Prozessen beschreiben, konnten nicht identifiziert werden. Eine Entwicklung würde eine Effizienzüberwachung und -optimierung auch komplexer Prozesstechniken ermöglichen.

4.2.3 Physikalisch motivierte Einflussgrößen

In vielen Fällen ist eine Benennung treffender Einflussgrößen eine große Herausforderung bei der Entwicklung aussagekräftiger Modelle für das Effizienzcontrolling und die automatisierte Effizienzregelung. Die Einflussgrößen wirken meistens nicht linear auf die CO₂-relevanten Aufwände. Gängige Regressionsverfahren unterstellen jedoch einen linearen Einfluss. Diese Problemstellung ist nur wenig bekannt und führt tw. zu systematischen Fehlern in der Auswertung der fortlaufenden Verbesserung, in der Anlagenüberwachung und im Benchmarking. Die Linearisierung der Wirkung von Einflussgrößen kann nach Erfahrungen von ÖKOTEC besonders gut gelingen, wenn die physikali-

schen Zusammenhänge des jeweiligen Prozesses als Einflussgröße abgebildet werden. Es fehlt jedoch an Leitfäden, wie für beliebige Prozesse strukturiert die Einflussgrößen in physikalische Zusammenhänge gefasst werden können. Die Kennzahlenmethodik sollte um eine solche Anleitung erweitert werden.

4.2.4 Vernetzte Prozesse für ganzheitliche Effizienzoptimierung

Beim Effizienzcontrolling stehen nicht immer einzelne Anlagen im Fokus, häufig sollen Verbünde an Anlagen als Gesamtsystem überwacht werden. Bei der automatisierten Regelung von Anlagen mit dem Ziel maximaler Effizienz bzw. minimaler CO₂-Emissionen kommt das Zusammenspiel dieser vernetzten Prozesse noch bedeutend stärker zum Tragen. Diese Effizienzoptimierungsansätze können noch nicht abwägen, ob eine geringere Effizienz der einen Anlage mit Blick auf eine dadurch gesteigerte Effizienz einer anderen Anlage gerechtfertigt ist. Die optimale Effizienz im Systemverbund kann dann bestimmt werden, wenn die Teilsysteme in ihren Systemgrenzen sauber abgegrenzt und kennzahlenbasiert vernetzt sind. Es fehlt jedoch an Leitfäden, die eine saubere Abgrenzung und die Definition dafür nötiger Hilfssysteme (z. B. „Verteilung“) methodisch beschreiben.

4.2.5 Effizienz zwischen Batches vergleichen

Batch-Prozesse können hochvariable Eigenschaften der Eingangsstoffe aufweisen. Dies führt dazu, dass man Batches nicht mehr vergleichen kann, wenn die Unterschiede nicht in den Modellen abgebildet werden. Als Lösungsansatz ist eine genaue Abgrenzung der Eingangsstoffe denkbar. Dies würde allerdings eine sehr hohe Anzahl Einflussgrößen in den Modellen bewirken.

Eine Überschaubarkeit könnte ggf. durch Clusterung erreicht werden oder indem die Unterschiede in physikalischen Zusammenhängen beschrieben werden können.

4.2.6 Effizienzcontrolling im betriebswirtschaftlichen Controlling verankern

Controllingabteilungen sind es seit Jahren gewohnt, insbesondere durch Planung und regelmäßige Soll-Ist-Vergleiche erfolgsrelevante Sachverhalte zu steuern. Es macht daher Sinn, diesen Erfahrungsschatz auch für die Steuerung von Energieverbräuchen, -kosten und CO₂-Emissionen zu nutzen. Um dies zu erreichen, ist es nötig, in Unternehmen vorhandene Controlling-Prozesse zu modifizieren. Die vorhandenen Werkzeuge des betriebswirtschaftlichen Controllings sind häufig ERP-Systeme für die Kostenträgerrechnung. Das technische Controlling nutzt eigene Lösungen auch mit Funktionalitäten zur Modellierung dynamischer Soll-Werte. Um ein Effizienzcontrolling durch die betriebswirtschaftlichen Controller zu ermöglichen, werden Schnittstellen zwischen den betriebswirtschaftlichen und den technischen Controlling-Lösungen benötigt. Es sollte eine quelloffene Schnittstelle zum Datenaustausch zwischen und zur gegenseitigen Steuerung der Softwareprodukte entwickelt werden.

4.3 Steuerung von Carbon Costs & Emissionen in bestehenden Controlling- und Kostenrechnungssystemen

Autoren: Dr. Harfst, Nathanael; Ratjen, Georg

4.3.1 Hintergrund, Zielsetzung und Vorgehen

Dieser Kurzleitfaden greift die unterschiedlichen Systemgrenzen für dieselben Anlagen im betriebswirtschaftlichen Controlling (Kostenstellen) und im technischen Effizienzcontrolling (Systeme) auf. Es zeigt auf, wie diese Welten miteinander synchronisiert werden können. Der Kurzleitfaden beschreibt erste Ansätze zur Steuerung von Carbon Costs & Emissionen in bestehenden Controlling- und Kostenrechnungssystemen. Am Ende des Kurzleitfadens geben die Autoren ein Beispiel zur Veranschaulichung.

Anwendungsbeispiele

Inhalte

- CO_{2e}-Emissionen mit bestehenden Controllingstrukturen planen und monitoren
- Ableitung nötiger struktureller Voraussetzungen zur Integration
- Darstellung der möglichen Verrechnungsmöglichkeiten für die Produktkalkulation

Monitoring

- CO_{2e}-Vermeidung verursachungsgerecht in bestehender Kostenstellenstruktur monitoren
- Einbeziehung von CO_{2e}-Emissionen bei der Budgetierung und Abweichungsanalyse
- Verantwortungsorientierte Verrechnung von CO_{2e}-Emissionen und deren Kosten

Produktkalkulation und Investitionen

- Auswirkung von Investitionen auf CO_{2e}-Kosten & -Emissionen auf Kostenstellen- und Produktebene
- CO_{2e}-Emissionen und Kosten in die Produktkalkulation überführen

4.3.2 Hintergrund: Steuerung von Carbon Costs & Emissionen in bestehenden Controlling- und Kostenrechnungssystemen

Steuerung von Carbon Costs & Emissionen in bestehenden Controlling- und Kostenrechnungssystemen“ richtet sich an Unternehmen, die ein Klimaschutzmanagement betreiben oder dies planen und ihre Kennzahlen, ihr Effizienzcontrolling und insbesondere die Verrechnung der damit verbundenen Kosten und Emissionen verfeinern wollen. In diesem Kurzleitfaden bezieht sich der Begriff Controlling stets auf das betriebswirtschaftliche Controlling. Der vorliegende Kurzleitfaden baut auf dem Kurzleitfaden „*Product Carbon Footprints and Product Carbon Costs*“ auf und zeigt, wie sich CO_{2e}-Emissionen innerhalb von Unternehmen besser in bestehende Controlling-Systeme

integrieren lassen, um diese z.B. bei Investitionsentscheidungen und der Produktkalkulation besser einzubeziehen.¹³

Der Kurzleitfaden zeigt Ihnen, wie Sie:

- **CO_{2e}-Emissionen mit bestehenden Controllingstrukturen planen und monitoren**

Es wird aufgezeigt, wie ermittelte **CO_{2e}-Emissionen** im Rahmen klassischer betriebswirtschaftlich orientierter Strukturen verrechnet und für die Produktkalkulation zugänglich gemacht werden können. Hierdurch erhalten Sie die Möglichkeit, direkte und indirekte CO_{2e}-bedingte Kosten und Emissionen – etwa auf Kostenstellenebene – zu verrechnen und verantwortungsorientiert zu steuern. Zusätzlich schaffen Sie Transparenz, welche stofflichen und energetischen Aufwände (z.B. Strom, Kältemittel, Frischwasser) bei diesen Anlagen (z.B. Kälteanlage) zur Erzeugung eines Nutzens (z.B. Kälte) anfallen und welche nachgelagerten Prozesse die erzeugten Nutzen in welchem Umfang nutzen. Die Broschüre zeigt zudem, wie sich die im Leitfaden „*Product Carbon Footprints und Product Carbon Costs*“ beschriebene Vernetzung von (CO_{2e})-Kennzahlen im Rahmen der klassischen innerbetrieblichen Leistungsverrechnung umsetzen lässt, um den „CO_{2e}-Rucksack“ und die dazugehörige Kosten entlang der Fertigungs- und Versorgungskette – mit vorhandenen Kostenstellenstrukturen – nachverfolgen zu können und eine verantwortungsorientierte Steuerung von Emissionen innerhalb des Unternehmens zu ermöglichen.

- **Strukturelle Voraussetzungen zur Integration von CO_{2e}-Emissionen in die Kostenrechnung schaffen**

Damit die verantwortungsorientierte Verrechnung von direkten und indirekten CO_{2e}-Emissionen innerhalb bestehender Kostenrechnungssysteme funktioniert, müssen insbesondere die Bilanzgrenzen der betrachteten technischen Prozesse und Produkte mit den Bilanzgrenzen der finanzorientierten Steuerung vereinheitlicht werden. Klassischerweise geschieht die Verrechnung von echten und unechten¹⁴ Gemeinkosten innerhalb von Unternehmen über Kostenstellen, denen wiederum z.T. Arbeitsplätze zugeordnet werden. Anfallende Kosten werden anhand der Kostenstellen – verantwortungsorientiert und möglichst verursachungsgerecht – Bereichen und Prozessen zugeordnet. Häufig sind die Bilanzgrenzen der Kostenstellen nicht mit denen der im Rahmen von Energie- und Klimamanagementsystemen definierten Betrachtungsobjekten deckungsgleich – etwa den SEUs¹⁵ bei der ISO 50001. Um die technisch abgeleiteten Kennzahlen bestmöglich für finanzorientierte Analysen nutzen zu können, sind die Bilanzgrenzen einheitlich zu definieren. Neben der einheitlichen Definition der Bilanzgrenzen sind die zur Verrechnung nötigen Daten (kWh, m³ etc.) in die bestehenden Controlling-Systeme zu integrieren.

- **Verrechnungsmöglichkeiten für die Produktkalkulation und die Investitionsplanung aufzeigen**

Auf Basis der verantwortungsorientierten Verteilung der Kosten und Emissionen lassen sich die Auswirkungen von Investitionen in effizientere bzw. CO_{2e}-ärmere Prozesse planen, monitoren und bewerten und Effizienzgewinne direkt in der Produktkalkulation abbilden.

¹³ Interne, kalkulatorische CO₂-Preise sind ein Managementinstrument, um die Genehmigung von Klimaschutzmaßnahmen bei gleichbleibenden Kriterien und Konzernleitlinien an Amortisation, Kapitalwert etc. zu stärken.

¹⁴ Bei unechten Gemeinkosten handelt es sich um solche, die grundsätzlich Einzelkostencharakter haben, sich also direkt zuordnen lassen würden – allerdings als Gemeinkosten über Verrechnungsschlüssel verteilt werden, da der Aufwand zur direkten Verteilung zu hoch im Verhältnis zum Kostenanteil am Kostenträger wäre.

¹⁵ SEU englisch für significant energy use → wesentlicher Energieeinsatz, der im Sinne eines Energiemanagementsystems nach ISO 50001:2018 vertieft analysiert und überwacht wird.

4.3.3 Schaffung struktureller Voraussetzungen zur Integration von CO_{2e}-Emissionen in die Kostenrechnung

4.3.3.1 Vereinheitlichung von Bilanzgrenzen

Eine Integration der energie- und klimabezogenen Steuerung in vorhandene Controllingstrukturen wird schon länger von verschiedenen Autoren befürwortet.¹⁶ Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Nutzung vorhandener **Strukturen**. Hierbei handelt es sich insbesondere um verantwortungsorientierte Kostenstellenstrukturen, IT- und Kennzahlensysteme zur wirksamen Steuerung des Energieeinsatzes und der damit verbundenen Emissionen und Kosten. Da in Unternehmen regelmäßig Steuerungsstrukturen innerhalb von Controllingssystemen etabliert sind, erscheint es zweckmäßig, Insellösungen zu vermeiden und vorhandene Ressourcen, Strukturen und Kompetenzen für die energie- und klimabezogene Steuerungsfunktion bestmöglich zu nutzen.

Wie in dem Leitfaden „*Product Carbon Footprints und Product Carbon Costs*“ beschrieben, werden (Produktions-)Prozesse als Systeme verstanden, die **Nutzen** produzieren und **Aufwände** aufweisen. Die betrachteten Nutzen und Aufwände sind direkt mit der zugrunde gelegten Bilanzgrenze des betrachteten Systems verbunden, da sie diese überschreiten. Unternehmen als Ganzes ließen sich grundsätzlich auch als ein gesamthafter Prozess mit Nutzen und Aufwänden verstehen.

Da im *Gesamtsystem* eines Unternehmens jedoch regelmäßig mehrere z.T. sehr unterschiedliche Prozesse mit vielfältigen Aufwänden und Nutzen vorliegen, werden diese in kleinere Prozessabschnitte und Bereiche unterteilt. Die Unterteilung des *Gesamtsystems* eines Unternehmens erlaubt eine detailliertere Analyse von Prozesszusammenhängen und die damit verbundenen Möglichkeiten, Energieflüsse und die damit verbundenen CO_{2e}-Emissionen und Kosten genauer zu ermitteln und zu überwachen.

Gleiches gilt auch für die in der Kostenrechnung definierte Bilanzgrenzen zur Verrechnung von finanziellen Aufwänden und Nutzen – den Kostenstellen. Sie bilden die Basis der Verrechnung anfallender Kosten zu Prozessen und Bereichen. Dies dient der möglichst verursachungsgerechten Verrechnung von Kosten zu Prozessen und Bereichen, in denen sie „entstanden“ sind, mit dem Ziel diese auch den entsprechenden Produkten (Kostenträgern) zuzuordnen zu können.

Darüber hinaus bieten die Kostenstellen gleichzeitig die Basis für eine verantwortungsorientierte Steuerung der angefallenen Kosten, denn den Kostenstellen wird i.d.R. ein Kostenstellenverantwortlicher zugewiesen, dem die Aufgabe zukommt, die zugeordneten Kosten zu planen, zu überwachen und bei Abweichungen vom Plan ggf. Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Die Steuerung von Kosten auf Kostenstellen folgt somit dem PDCA-Zyklus,

- da Kosten geplant (Plan),
- Aufgaben umgesetzt (Do),
- die angefallenen Kosten überwacht (Check) und
- bei Abweichungen Gegenmaßnahmen (Act)eingeleitet werden.

Es erscheint somit zielführend, diese vorhandenen Strukturen und Steuerungsprozesse für die systematische Steuerung von CO_{2e}-Emissionen und den damit verbundenen Kosten zu nutzen. Ein weiterer Vorteil dieser Vorgehensweise ergibt sich, weil die Kostenstellenrechnung die Basis der Produktkalkulation ist, und somit eine verursachungsgerechtere Zuordnung der Emissionen auf Produkte erlaubt.

¹⁶ Vgl. etwa Harfst, N. (2021). *Controlling als Treiber der Energieeffizienz: Integration von Energiemanagement in vorhandene Controllingstrukturen*. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. oder Nissen, U. (2014). *Energiekostenmanagement: Eine Einführung für Controller, Manager und Techniker in Industrieunternehmen*. Schäffer-Poeschel.

Um sich dieses regelmäßig in Unternehmen bereits angelegte Steuerungssystem für das Monitoring und die Verrechnung von CO_{2e}-Emissionen nutzbar zu machen, ist es jedoch nötig,

- dass sich die zur technischen Beschreibung der Prozesse genutzten Bilanzgrenzen mit denen der Kostenstellen decken und
- die zur Verrechnung der Emissionen benötigten Daten in die betriebswirtschaftlichen Systeme (etwa ERP-Systeme) überführt werden.

Die Anpassung der Bilanzgrenzen ist somit eine nötige Voraussetzung, um die technisch-orientierten Analysen für die Produktkalkulation und die verantwortungsorientierte Steuerung der Emissionen nutzbar zu machen. Decken sich die Bilanzgrenzen zwischen technischer Prozessbeachtung und Kostenstelle nicht, sind entweder die Bilanzgrenzen zur Modellierung der Prozesse den Bilanzgrenzen der Kostenstellen anzupassen oder andersherum. Bei beiden Vorgehensweisen gibt es Vor- und Nachteile. Änderungen des technischen Bilanzrahmens können dazu führen, dass komplexe Wechselwirkungen von Prozessen, die einer Kostenstelle zugeordnet sind oder deren Grenze überschreiten, zu Problemen bei der Modellierung führen. Andersherum kann die Anpassung der Bilanzgrenzen der Kostenstellen dazu führen, dass auch die mit den Kosten verbundenen Produktkalkulationen überarbeitet werden müssen.

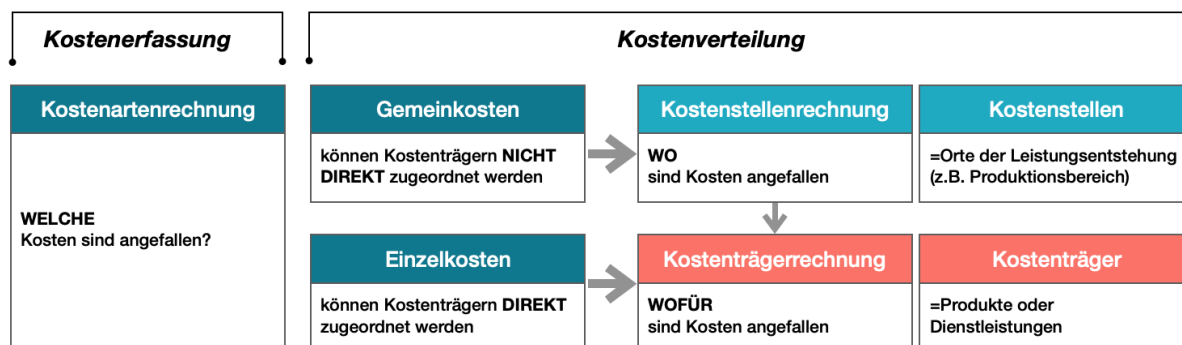
Sind die Bilanzgrenzen synchronisiert, lassen sich Daten zu den Aufwänden und Nutzen für die Modellierung und Überwachung der technischen Zusammenhänge gebrauchen. Zusätzlich wird die Verrechnung und Steuerung von CO_{2e}-Emissionen und den damit verbundenen Kosten ermöglicht.

Unser Ziel ist es, geeignete Kennzahlen für Produktionsprozesse zu bestimmen und darauf aufbauend, die Kennzahlen im Monitoring und Benchmarking zu nutzen. Ausgangspunkt ist die Beschreibung von Produktionsprozessen als Systeme, die **Nutzen** produzieren und **Aufwände** aufweisen.

4.3.3.2 Verrechnung von Leistungen innerhalb des Unternehmens auf Kostenträger

Im klassischen internen Rechnungswesen werden zunächst alle anfallende Kosten erfasst, kategorisiert und Kostenarten zugeordnet – die sogenannte Kostenartenrechnung. Anschließend folgt die Verrechnung der angefallenen Kosten auf die Kostenträger. Hierzu werden Einzelkosten und Gemeinkosten voneinander abgegrenzt. Einzelkosten sind solche, die sich direkt auf Kostenträger (Produkte oder Dienstleistungen) verrechnen lassen (vgl. Abbildung 20). Hierzu zählen klassischerweise z.B. die Materialkosten eines Produkts. Alle Kosten, die sich nicht direkt einem Kostenträger zuordnen lassen – sogenannte Gemeinkosten – werden im Rahmen der Kostenstellenrechnung verbucht und anhand unterschiedlicher Verfahren der Kostenträgerrechnung zugänglich gemacht.

Abbildung 20: Übersicht Kostenerfassung und- verteilung¹⁷



Einige Energieflüsse und damit verbundene CO_{2e}-Emissionen und Kosten lassen sich wie klassische Einzelkosten Kostenträgern direkt zuordnen – etwa Dampfverbräuche eines Produktionsprozesses. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass die Energiemengen der Prozesse messtechnisch erfasst werden. Zur Verrechnung direkt zuordenbarer Energiemengen und den damit verbundenen Emissionen kämen laut Nissen entweder eine Verrechnung über Stücklisten oder Arbeitspläne in Frage.¹⁸

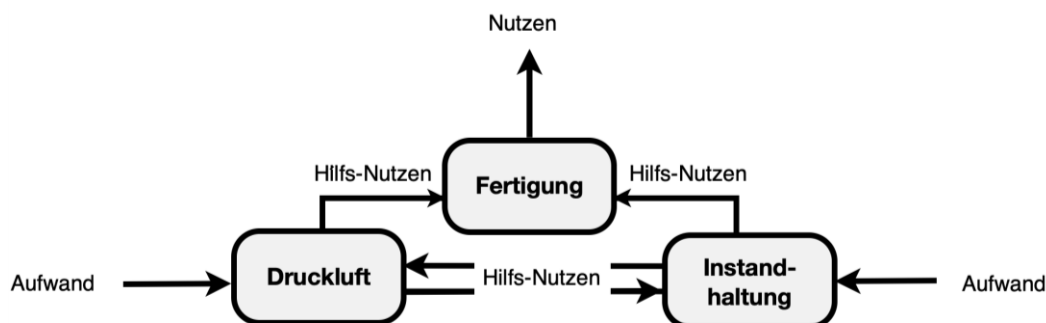
Andere CO_{2e}-Emissionen und Kosten lassen sich hingegen nicht direkt zuordnen, da sie entweder keinen direkten Bezug zum Kostenträger aufweisen (etwa der Stromverbrauch des Büros des Geschäftsführers) oder aber im Unternehmen zunächst noch gewandelt und an unterschiedlichen Stellen als innerbetriebliche Leistungen verteilt werden (etwa mit Strom erzeugte Druckluft als Nutzenergieart).

Gewandelte Energien oder die Herstellung von Zwischenprodukten werden regelmäßig als **innerbetriebliche Leistungen** angesehen. Zu deren Verrechnung lassen sich Kostenstellen in Unternehmen in Hilfs- und Hauptkostenstellen unterteilen. Hilfskostenstellen werden hierbei Bereiche und Prozesse zugeordnet, die innerbetriebliche Leistungen erbringen, die zur Erzeugung des eigentlich beabsichtigten Nutzens (durch die Hauptkostenstellen) benötigt werden.

Nehmen wir beispielhaft an, ein Unternehmen erzeugt Druckluft für unterschiedliche Anwendungen. Der Druckluftkompressor wird einer Hilfskostenstelle „*Druckluft*“ zugeordnet und alle relevanten Aufwände für Strom, Wartung durch die Instandhaltung etc. der Kostenstelle der Druckluftherzeugung zugerechnet (vgl. Abbildung 21). Mit Hilfe der Kennzahlenmethodik kann unter Berücksichtigung von Daten zum Energieeinsatz und zu den produzierten Luftmengen detailliert beschrieben werden, wieviel CO_{2e}-Emissionen jeder Kubikmeter Druckluft hat. Im Rahmen der Kostenstellenrechnung ließen sich darüber hinaus die CO_{2e}-Emissionen der mit der Kostenstelle *Druckluft* verbundenen Instandhaltungsaktivitäten und der Produktion und Bereitstellung des Druckluftkompressors bestimmen. Um nun die zur Produktion der Druckluft angefallenen CO_{2e}-Mengen auf die Hauptkostenstellen verteilen zu können, sind die von den Hauptkostenstellen genutzten Druckluftmengen zu erfassen und die CO_{2e}-Emissionen anhand dieses Schlüssels auf die Hauptkostenstellen zu verteilen. Darauf aufbauend lassen sich *Product Carbon Footprints* bilden, die der vorhandenen Kostenstellenstruktur und damit der Verteilung von Emissionen anhand vorhandener Verteilmechanismen der Produktkalkulation Rechnung tragen.

¹⁷ Eigene Abbildung in Anlehnung an Ernst, C., Schenk, G., Schuster, P. (2017). Aufbau der Kosten- und Leistungsrechnung am Beispiel der Vollkostenrechnung. In: Kostenrechnung klipp & klar. WiWi klipp & klar. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg.

¹⁸ Nissen, U. (2014). *Energiekostenmanagement: Eine Einführung für Controller, Manager und Techniker in Industrieunternehmen*. Schäffer-Poeschel, S. 279ff.

Abbildung 21: Beispielhafte Struktur zur Verrechnung innerbetrieblicher Leistungen

Quelle: Eigene Abbildung.

Diese Verrechnung von innerbetrieblichen Leistungen gehört zum Standard des internen Rechnungswesens. So werden etwa die Kosten der Instandhaltungsabteilung regelmäßig anhand der für andere Kostenstellen geleisteten Stunden verrechnet und somit der Weiterverrechnung in der Produktkalkulation zugänglich gemacht. Analog lassen sich auch die durch die Instandhaltungsabteilung verursachten CO_{2e}-Emissionen über die erbrachten Leistungen auf die Hauptkostenstellen verteilen (vgl. Abbildung 21). Hieraus ergeben sich innerbetriebliche Verrechnungspreise bzw. Verrechnungsemissionen auf Basis der tatsächlichen Leistungen von Hilfskostenstellen.

Zur Verwirklichung dieser Vernetzung zwischen Hilfs- und Hauptkostenstellen sind Daten zu den Hilfs-Nutzen, die zwischen den Kostenstellen geleistet werden, zu erfassen und als *Leistungsarten* innerhalb der Kostenstellen zu führen. Hierzu sollten automatisierte Schnittstellen zwischen energiebezogenen Erfassungssystemen und den ERP-Systemen geschaffen werden.

Emissionen, die sich weder direkt noch über den Umweg der innerbetrieblichen Leistungsverrechnung möglichst verursachungsgerecht Kostenträgern zuordnen lassen, ließen sich analog zu Gemeinkostenzuschlagssätzen auf die direkten Emissionen aufschlagen. Hierzu ist es jedoch nötig einen Bezug für die Beaufschlagung zu wählen. Häufig werden bei den Gemeinkosten die Einzelkosten als Basis für die Beaufschlagung gewählt. In Anlehnung an diese Vorgehensweise können *Gemeinmissionen* auf Basis der direkten CO_{2e}-Emissionen aus der produktbezogenen Emissionsverteilung berechnet werden. Dies bedeutet, dass auf jedes Kilogramm direkt zuordenbarer CO_{2e}-Emissionen pro Produkt ein gewisser prozentualer Aufschlag berechnet wird. Dies soll dazu führen, die gesamten CO_{2e}-Emissionen des Unternehmens auf die Produkte zu verteilen. Werden nun Effizienzmaßnahmen zur Reduktion der Energieflüsse oder benötigter Ressourcen geplant und umgesetzt, lassen sich die Effekte anhand der CO_{2e}-Footprints der Kostenträger planen und überwachen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die ermittelten und möglichst verursachungsgerecht verteilten CO_{2e}-Emissionen mit internen Verrechnungspreisen zu belegen, um Investitionen in CO_{2e}-ärmere Technologien und Prozesse zu fördern.

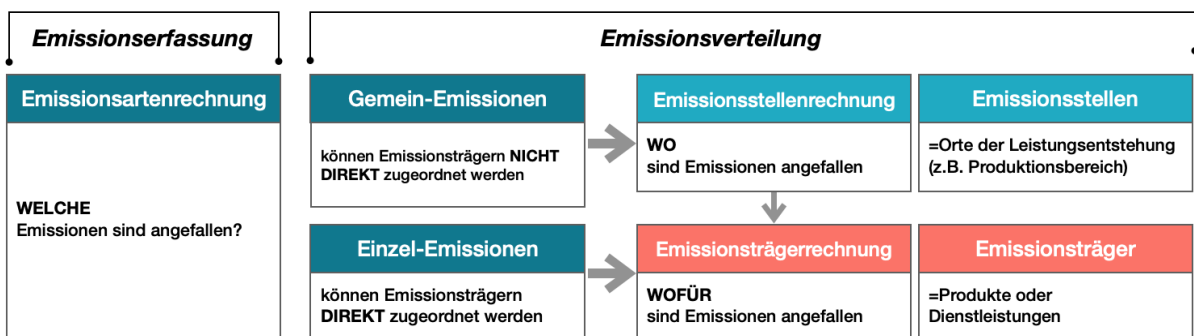
4.3.3.3 Erweiterung der Kostenrechnung um die Zielgröße „CO_{2e}“

Um eine möglichst verursachungsgerechte Verteilung der Emissionen zu Stande zu bringen, ist es nötig, neben der Zielgröße Euro noch die Zielgröße CO_{2e}-Emissionen in der Kosten- und Leistungsrechnung zu definieren. Die Ermittlung der gesamthaften Emissionen von Unternehmen findet sich bereits bei der Erstellung von Corporate Carbon Footprints, also unternehmensweiten Emissionsbilanzen. Hierzu wird regelmäßig im Scope 3 zwischen vor- und nachgelagerten Emissionen unterschieden. Die Basis-Mengen der bezogenen Güter und Dienstleistungen im Scope 1 & 2 sowie den vorgelagerten Kategorien des Scope 3 – nach dem Greenhouse-Gas-Protokoll – sind in der Regel (mit Ausnahmen der Emission des Pendelns der Mitarbeitenden) bereits in der Kosten- und Leistungsrechnung erfasst. Auf Basis der Mengen lassen sich mit Hilfe von Emissionsfaktoren dann die absoluten Emissionen einzelner Güter und Dienstleistungen bestimmen.

Die Verteilung dieser Emissionen auf Produkte resultiert in einem Product Carbon Footprint (hier grade to gate). Eine Beschreibung einer Vorgehensweise zur Zuteilung von Emissionen auf Produktebene findet sich etwa auch in der ISO 14067.

Im folgenden Beispiel soll diese Zurechnung anhand der Verrechnung der Emissionen mittels der Kostenstellen gezeigt werden. Hierzu erweitern wir im ersten Schritt nun also die Kosten- und Leistungsrechnung um die Zielgröße CO_{2e}-Emissionen siehe (Abbildung 22).

Abbildung 22: Erweiterung der Kosten und Leistungsrechnung zur Emissionsrechnung



Quelle: Eigene Abbildung.

Die grundsätzliche Verrechnungslogik, welche sich aus der klassischen Kosten und Leistungsrechnung ergibt, bleibt gleich. Im Folgenden ist die Erweiterung der Kosten-Leistungsrechnung zur Bestimmung und Steuerung der CO_{2e}-Emissionen beispielhaft dargestellt.

4.3.4 Beispielhafte Darstellung von Verrechnungsmöglichkeiten auf Kostenstellen und der Produktkalkulation

4.3.4.1 Emissionsarten-Rechnung

Das folgende Beispiel bezieht sich auf die Herstellung von Kartonagen. Am Anfang steht, wie in der Kostenrechnung, die Erfassung aller Emissionsarten. Hierbei handelt es sich zum einen um direkte Emissionen, etwa jenen, die klassischerweise dem Scope 1 zugeordnet werden – Emissionen aus Verbrennung von fossilen Energieträger oder aber der Klimawirkung flüchtiger Gase. Zum anderen können indirekte Emissionen, welche sich auf Produkte, Kapitalgüter und ähnliche Kategorien des so genannten Scope 3 beziehen, in der Emissionsarten-Rechnung angelegt bzw. vorhandenen Kostenarten zugeordnet werden. Die Emissionen, welche sich aus dem Pendeln der Mitarbeitenden zur Produktionsstätte ergeben, werden etwa der Rubrik Personal zugeordnet (siehe Tabelle 1), wobei die Personalkosten sich auf Löhne und Gehälter beziehen. Aus den dargestellten Gütern und Dienstleistungen ergeben sich Gesamtkosten i.H.v. rund 17 Millionen Euro und eine Klimawirkung von ca. 14.500 Tonnen CO_{2e} für den Betrachtungszeitraum 2021.

Tabelle 5: Kosten- und Emissionsartenrechnung 2021

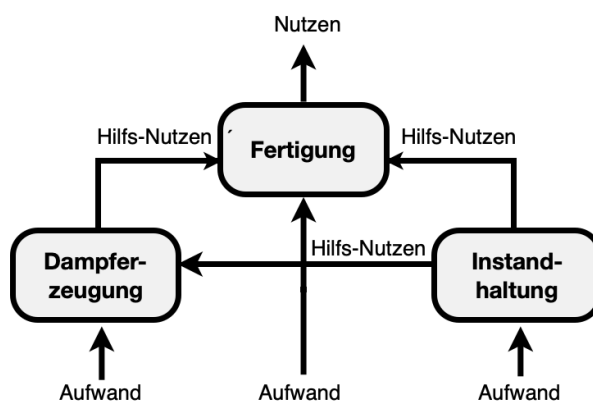
| Kosten / Emissionsart | Unter-kategorie der Kosten / Emissionsart | Kosten | relevante Menge | CO _{2e} -Faktor-Gesamt in [kg CO _{2e} / Einheit] | Emissionen [tCO _{2e}] | Faktor-Scope 1 [kg CO _{2e} / Einheit] | Faktor-Scope 2 [kg CO _{2e} / Einheit] | Faktor-Scope 3 [kg CO _{2e} / Einheit] |
|---------------------------|---|--------------|-----------------|--|---------------------------------|--|--|--|
| Energie | | 2.208.894 € | | | 7242,6 | | | |
| | Erdgas | 1.862.531 € | 28.654.321 kWh | 0,23 | 6533,2 | 0,201 | | 0,027 |
| | Diesel | 74.758 € | 44.499 l | 3,29 | 146,5 | 2,649 | | 0,642 |
| | Strom | 271.605 € | 1.234.567 kWh | 0,46 | 563,0 | | 0,456 | |
| Hilfs- und Betriebsstoffe | | 1.250.624 € | | | 4894,0 | | | |
| | Kältemittel (R407c) | 1.395 € | 15 kg | 1774,00 | 26,6 | 1.774 | | |
| | Entschäumer | 1.048.866 € | 80.994 kg | 0,93 | 75,0 | | | 0,926 |
| | Sonstige RHB | 200.363 € | ... | ... | 4819,0 | | | ... |
| Material | | 11.287.030 € | | | 2358,0 | | | |
| | Altpapier | 6.037.429 € | 35.514.286 kg | 0,04 | 1243,0 | | | 0,035 |
| | Stärke | 4.996.178 € | 942.675 kg | 0,79 | 740,0 | | | 0,785 |
| | Sonstige Materialien | 253.423 € | 654.450 kg | 0,57 | 375,0 | | | 0,573 |
| Personal | | 2.195.514 € | | | 55,3 | | | |
| | Mitarbeitende | 2.195.514 € | 323.456 km | 0,17 | 55,3 | | | 0,171 |
| Gesamt-emissionen | | 16.942.062 € | | | 14549,9 | | | |

4.3.4.2 Verrechnung von Emissionen über Kostenstellen

Innerhalb dieses vereinfachten Beispiels werden die erfassten Gesamtkosten und Emissionen im Rahmen der Kostenstellenrechnung auf die folgenden Kostenstellen aufgeteilt:

- die Hilfskostenstellen *Kraftwerk* und *Instandhaltung* sowie die
- Hauptkostenstellen *Fertigung* und *Sonstige Verwaltung*.

Abbildung 23: Kostenstellenstruktur Beispiel



Quelle: Eigene Abbildung.

Die Dampferzeugung und Instandhaltung haben Aufwände und generieren Hilfsnutzen für die eigentliche Produktion. So wird etwa Dampf erzeugt, der in der Fertigung genutzt wird. Alle auf der Kostenstelle anfallende Emissionen und Kosten werden über die *Leistungsart Dampf* in Kilowattstunden verrechnet. Hierdurch ergeben sich finanzielle, aber auch emissionsbezogene Verrechnungssätze pro gelieferter Menge Dampf (siehe Tab. 2).

Tabelle 6: Kostenstellenbericht Dampferzeugung inkl. Emissionen – Leistungsart Dampf in kWh

| Kosten / Emissionsart | Kosten | relevante Menge | kg CO _{2e} /Mengeneinheit | Emissionen in tCO _{2e} |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------------|------------------------------------|---------------------------------|
| Erdgas | 1.862.530,87 € | 28.654.321 kWh | 0,23 | 6.533,19 |
| Strom | 80.395,04 € | 365.432 kWh | 0,46 | 562,96 |
| Personal | 86.463,00 € | 15.840 km | 0,17 | 2,71 |
| Summe | 2.029.388,91 € | | | 7.098,86 |
| Leistungsart: Dampf | | 24.356.173 kWh | | |
| Verrechnungsgröße je Leistungsart | 0,08 € | | | 0,291 kg CO _{2e} |

Ähnliches gilt für die Hilfskostenstelle der Instandhaltung, bei der die Kosten und Emissionen für Personal, Strom und das Kältemittel der Klimaanlage, dargestellt sind. Diese werden über die 1.800 Stunden, welche die Instandhaltung geleistet hat, verteilt und anhand dieser Leistung den Hauptkostenstellen zugewiesen.

Tabelle 7: Kostenstellenbericht Instandhaltung inkl. Emissionen – Leistungsart Stunden

| Kosten/Emissionsart | Kosten | relevante Menge | kg CO _{2e} /Mengeinheit | Emissionen in tCO _{2e} |
|-----------------------------------|---------------------|-----------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Strom | 5.595,04 € | 25.432 kWh | 0,46 | 11,70 |
| Kältemittel (R407c) | 1.394,70 € | 15 kg | 1774 | 26,61 |
| Personal | 345.852,00 € | 63.360 km | 0,17 | 10,83 |
| Summe | 352.841,74 € | | | 49,14 |
| Leistungsart: Stunde | | 1800 | | |
| Verrechnungsgröße je Leistungsart | 196,02 € | | | 27,302 kg CO _{2e} |

Die Hauptkostenstelle der Fertigung hingegen empfängt Leistungen der Hilfskostenstellen *Instandhaltung* welche mit Kosten, aber auch mit entsprechenden Emissionen behaftet sind. Eine Aufstellung der bezogenen Leistungen aus den Hilfskostenstellen, aber auch darüber hinaus findet sich in Tabelle 4. Aus den 1.600 Stunden Instandhaltungsleistung ergeben sich somit 43,7 Tonnen CO_{2e} und Kosten in Höhe von 313.637 € auf der Kostenstelle der Fertigung.

Tabelle 8: Kostenstellenbericht Fertigung inkl. Emissionen

| Kosten / Emissionsart | Kosten | relevante Menge | kg CO _{2e} /Mengeinheit | Emissionen in t CO _{2e} |
|----------------------------|-----------------------|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Strom | 185.614,66 € | 843.703 kWh | 0,46 | 384,7 |
| Diesel | 50.791,44 € | 30.233 l | 3,29 | 99,5 |
| Entschäumer | 1.048.866,09 € | 80.994 kg | 0,93 | 75,0 |
| Personal | 1.037.556,00 € | 176.256 km | 0,17 | 30,1 |
| Verrechnung Instandhaltung | 313.637,10 € | 1.600 h | 27,30 | 43,7 |
| Summe | 2.636.465,29 € | | | 633,06 t CO_{2e} |

4.3.4.3 Verrechnung der direkten Emissionen über Stücklisten

Um nun die Kosten pro Tonne Produkt, aber auch die Emissionen pro Tonne Produkt zu ermitteln, lassen sich zunächst solche Ressourcen und die damit verbundenen Kosten und Emissionen, welche sich den Kostenträgern direkt zuordnen lassen, über Stücklisten verrechnen. Im vorliegenden Beispiel nehmen wir an, dass es zwei Produkte gibt, die eine unterschiedliche Materialzusammensetzung haben. Die Stücklisten und die damit verbundene Ermittlung der direkten Kosten und Emissionen finden sich in Tabelle 9 und Tabelle 10.

Tabelle 9: Einzelkosten und -emissionen des Produkts 1

| Komponente | Kosten pro Tonne | Gesamtkosten bei 26.065 Tonnen | Menge pro Tonne | CO _{2e} -Faktor-Gesamt kg CO _{2e} /Einheit | Emissionen in kg CO _{2e} /Tonne Karton Sorte 1 | Direkte Emissionen in tCO _{2e} bei 26.065 Tonnen Karton Sorte 1 |
|----------------------|------------------|--------------------------------|-----------------|--|---|--|
| Altpapier | 178,50 € | 4.652.697,2 | 1.050 kg | 0,035 | 36,8 | 957,9 |
| Stärke | 140,80 € | 3.670.026,7 | 22 kg | 0,79 | 17,4 | 453,0 |
| Sonstige Materialien | 3,90 € | 101.655,6 | 10 kg | 0,57 | 5,7 | 148,6 |
| Dampf | 56,66 € | 1.476834,1 | 680 kWh | 0,291 | 198,2 | 5166,0 |
| Gesamtemissionen | 379,86 € | 9.901.213,7 | | | 258,0 | 6.725,5 |

Aufgrund der unterschiedlichen Materialzusammensetzung der beiden Produkte ergeben sich unterschiedliche *direkte Produktkosten*, aber auch unterschiedliche *direkte CO_{2e}-Emissionen*.

Tabelle 10: Einzelkosten und -emissionen des Produkts 2

| Komponente | Kosten pro Tonne | Gesamtkosten bei 6.516 Tonnen | Menge pro Tonne | CO _{2e} -Faktor-Gesamt kg CO _{2e} /Einheit | Emissionen in kg CO _{2e} /Tonne Karton Sorte 2 | Direkte Emissionen in tCO _{2e} bei 6.516 Tonnen Karton Sorte 2 |
|----------------------|------------------|-------------------------------|-----------------|--|---|---|
| Altpapier | 212,50 € | 1.384.731,3 | 1.250 kg | 0,035 | 43,75 | 285,1 |
| Stärke | 236,80 € | 1.543.079,4 | 37 kg | 0,790 | 29,23 | 190,5 |
| Sonstige Materialien | 4,68 € | 30.496,7 | 12 kg | 0,570 | 6,84 | 44,6 |
| Dampf | 74,16 € | 483.228,8 | 890 kWh | 0,291 | 259,40 | 1.690,3 |
| Gesamtemissionen | 528,14 € | 3.441.536,2 | | | 339,22 | 2.210,5 |

4.3.4.4 Zuschlagskalkulation für sonstige Gemeinmissionen

Gemeinmissionen – also solche die sich nicht direkt Kostenträgern oder produktbezogenen Bereichen zuordnen lassen – können im Nachgang über Emissionszuschlagssätze analog zu Gemeinkostenzuschlagssätzen den Kostenträgern zugeordnet werden. Hierdurch wird sichergestellt, dass alle im Unternehmen angefallenen Emissionen den Kostenträgern zugeordnet werden können.

Tabelle 11: Produktkalkulation mit Kosten und Emissionen

| Kosten/Emissionsart | Gesamtkosten | Gemeinkostenzuschlagssatz | Stückkosten Sorte 1 | Stückkosten Sorte 2 | Gesamtemissionen in tCO _{2e} | Gemeinmissionszuschlagssatz | kg CO _{2e} /Tonne Sorte 1 | kg CO _{2e} /Tonne Sorte 2 |
|------------------------------|--------------|---------------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Einzel-Kosten/Emissionen | 13.342.750 € | | 379,86 € | 528,14 € | 8.936 | | 258,02 | 339,22 |
| Fertigungs-Kosten/Emissionen | 2.636.465 € | 19,76 % | 75,06 € | 104,36 € | 633 | 7,08 % | 18,28 | 24,03 |
| Herstell-Kosten/Emissionen | 15.979.215 € | | 454,92 € | 632,49 € | 9.569 | | 276,30 | 363,25 |
| Gemein-Kosten/Emissionen | 996.320 € | 6,24 % | 28,36 € | 39,44 € | 4.898 | 51,18 % | 141,42 | 185,93 |
| Gesamtemissionen | 16.975.535 € | 6,24 % | 483,28 € | 671,93 € | 14.467 | | 417,73 | 549,18 |

Mit der hier beschriebenen Vorgehensweise lassen sich Emissionen analog zu den Kosten innerhalb der betrieblichen Kosten- und Leistungsrechnung abbilden. Diese Vorgehensweise erscheint zweckmäßig, denn:

- die mengenmäßigen Werte der maßgeblichen Güter und Dienstleistungen sind bereits in der Finanzbuchhaltung vorhanden;

- die Verrechnung der Emissionen auf Bereiche und Kostenträger ist sichergestellt und die dafür nötigen Verteilungsschlüssel sind bereits gebildet;
- die Verrechnung innerbetrieblicher Leistungen ist angelegt,
- Änderungen in Kosten und Emissionen werden im Rahmen von regelmäßiger Überarbeitung der Kalkulationen sofort wirksam.

Hierdurch entstehen dynamische Werte für Emissionen bei den Kostenstellen und Kostenträgern, deren Relevanz in Zukunft zu wachsen scheint.

5 **Arbeitspaket 3: Eingrenzung ausgewählter Prozesstechniken zur Demonstration**

Autoren: Arnold-Keifer, Sonja; Dr. Hirzel, Simon; Prof. Dr. Rohde, Clemens

5.1 **Hintergrund, Zielsetzung und Vorgehen**

Bei der Auswahl der betrachteten Prozesstechniken ist die Relevanz für Dekarbonisierung der Wirtschaft der maßgebliche Faktor. Im Rahmen des Vorhabens sollen exemplarisch drei bis fünf Prozesstechniken untersucht werden, die sowohl hinsichtlich der erzielbaren CO₂-Einsparungen relevant sind, als auch eine Übertragbarkeit der Ergebnisse innerhalb der Branche oder branchenübergreifend auf Prozesse mit ähnlichem Ablauf zulassen. Eine Technologie, die sehr spezifisch ist und in Deutschland nur an einem Standort eingesetzt wird, ist daher eher ungeeignet für die Untersuchung. Die Anzahl und die Art der zu betrachtenden Technologien ist mit dem Auftraggeber unter Berücksichtigung der Anzahl der verschiedenen Technologien in den zu erwartenden Projekten und des Budgetrahmens zu klären.

Ein Fokus soll dabei auf Technologien liegen, die branchenübergreifend und damit auch in mittelständischen Unternehmen eingesetzt werden, da gerade hier besonderer Weiterentwicklungsbedarf notwendig ist, da diese Unternehmen im Gegensatz zu großen Unternehmen den Aufwand zur Erarbeitung passender Methoden zum Carbon Monitoring ohne Unterstützung schwerer alleine bewältigen können. Daneben sollte bei der Auswahl beachtet werden, dass ein besonderer Unterstützungsbedarf beim Monitoring besteht. Daher sind Prozesse zu betrachten, die eine gewisse Komplexität aufweisen.

Von hoher Relevanz bei den Demonstrationsvorhaben sind in einigen Branchen (bspw. chemische Industrie, Verarbeitung von Steinen und Erden) auch die prozessbedingten Emissionen, die z.T. nur indirekt ermittelt werden können. So kommen in der Aluminiumindustrie beispielsweise klimaschädlichen Emissionen durch SF₆ oder in der Zementindustrie nicht-energiebedingte Freisetzungen von CO₂ zum Tragen. Hier ist für die vollständige Erfassung der relevanten Emissionen neben einer Energiebilanzierung auch eine Stoffstrombilanz im Monitoring erforderlich.

Zusammenfassend sind die wesentlichen Auswahlparameter:

- Relevanz, Komplexität und Übertragbarkeit;
- Abdeckung der strukturellen Breite der Industrie;
- Abdeckung energie- und prozessbedingter Emissionen.
- Batch-Prozesse
- Untersuchung der vor- und nachgelagerten Ketten
- Recycling-Prozesse

5.2 Relevanz der Wirtschaftszweige für die Dekarbonisierung

Um die Relevanz verschiedener Prozesse für die Dekarbonisierung der Wirtschaft übersichtlich gegenüberzustellen werden mehrere Tabellen und Grafiken angefertigt.

Zunächst sind die Anzahl der Beschäftigten und der Jahresumsatz im Jahre 2019 der verschiedenen Industrie-Wirtschaftszweige in den folgenden Abbildungen zu sehen.

Abbildung 24: Beschäftigte der Industrie-Wirtschaftszweige 2019 (Destatis, 2020)

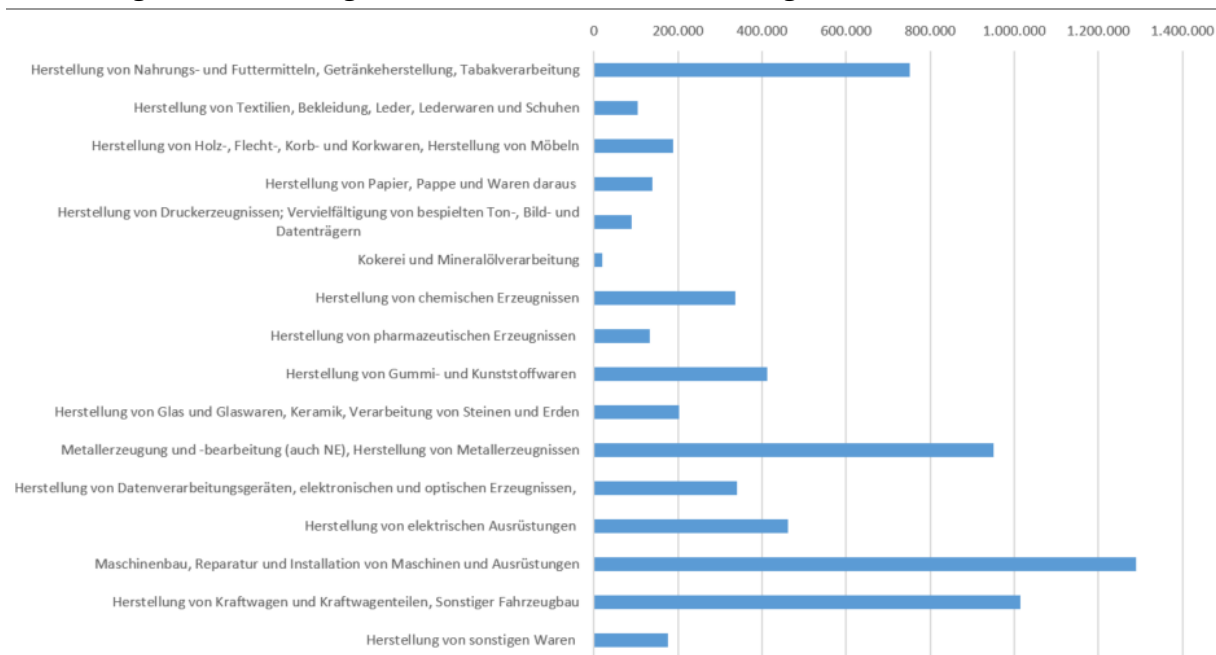
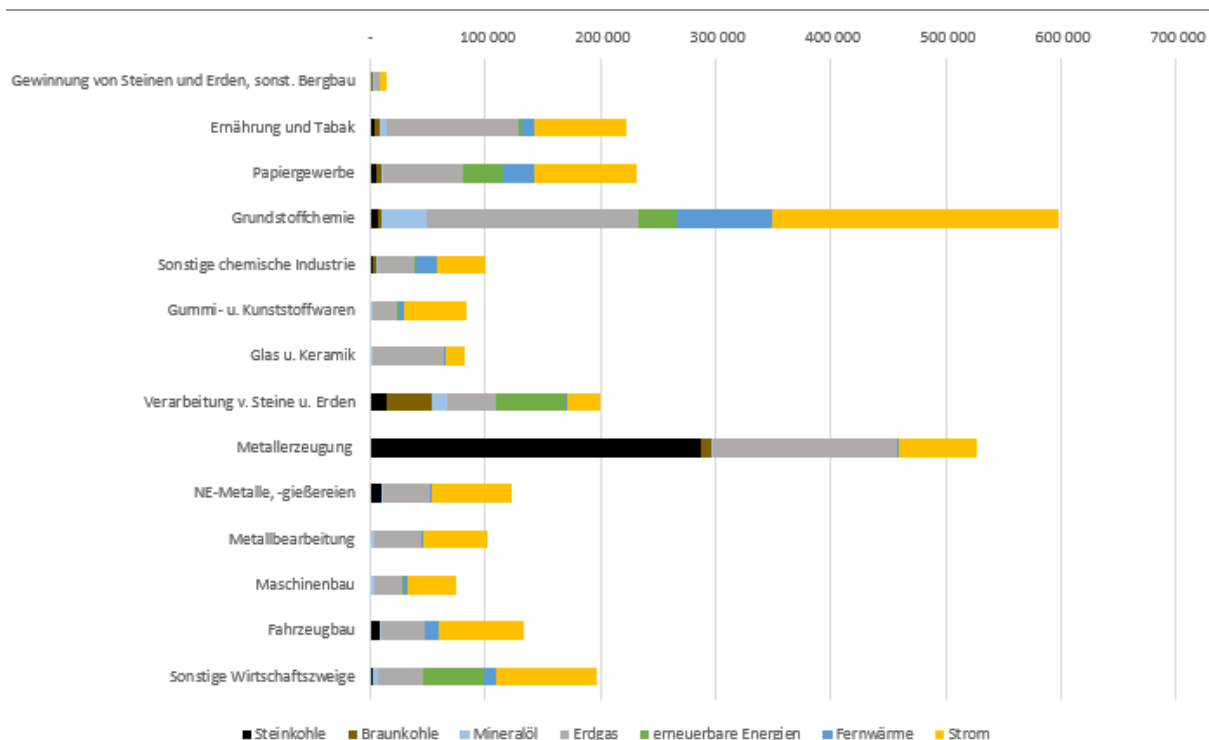


Abbildung 25: Jahresumsatz der Industrie-Wirtschaftszweige 2019 in Mio € (Destatis, 2020)



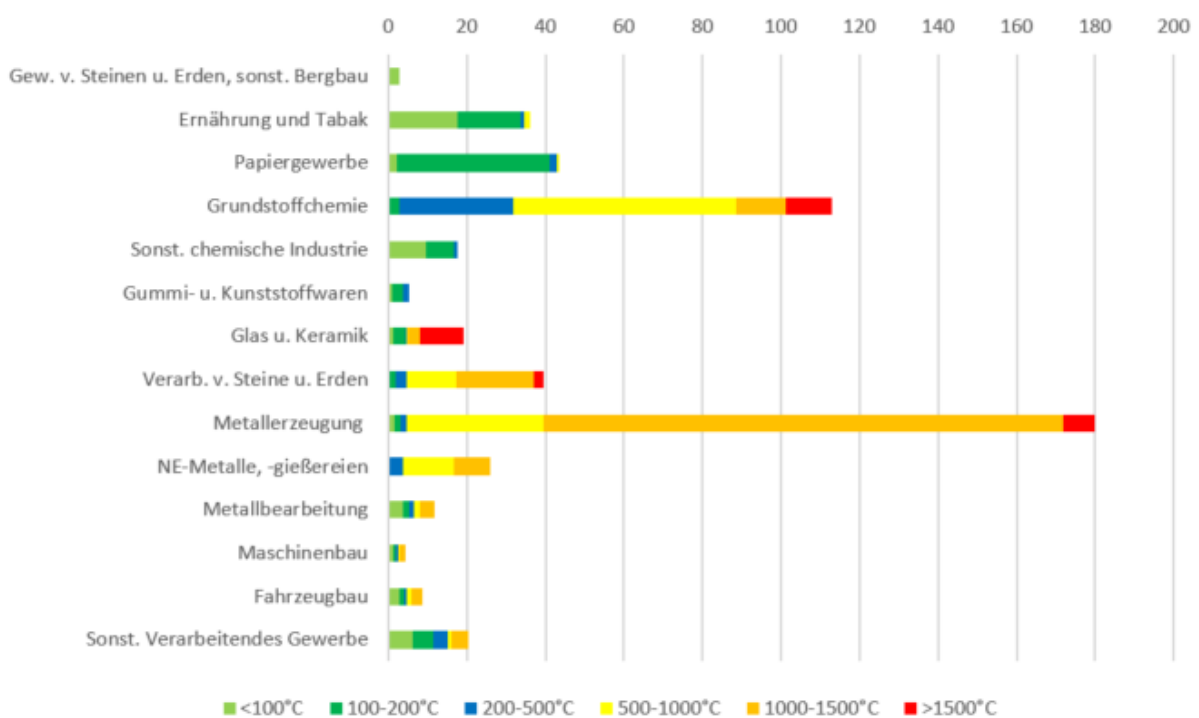
In der folgenden Abbildung wird der Endenergieverbrauch der Industrie-Wirtschaftszweige in die einzelnen Energieträger Steinkohle, Braunkohle, Mineralöl, erneuerbare Energien, Fernwärme und Strom aufgeteilt. Hierbei stechen vor allem die Grundstoffchemie und die Metallherzeugung durch große Energieverbräuche hervor. Dabei liegt vor allem bei der Metallherzeugung ein großer Anteil an Steinkohle zugrunde, womit ein hoher CO₂-Ausstoß verbunden ist. Der CO₂-Ausstoß der Grundstoffchemie ist abhängig von dem hohen Bedarf an Strom, dessen CO₂-Emissionen wiederum von dem verwendeten Strommix abhängig sind.

Abbildung 26: Industrieller Endenergieverbrauch [TJ] der Wirtschaftszweige 2019 (Fraunhofer ISI, 2019)



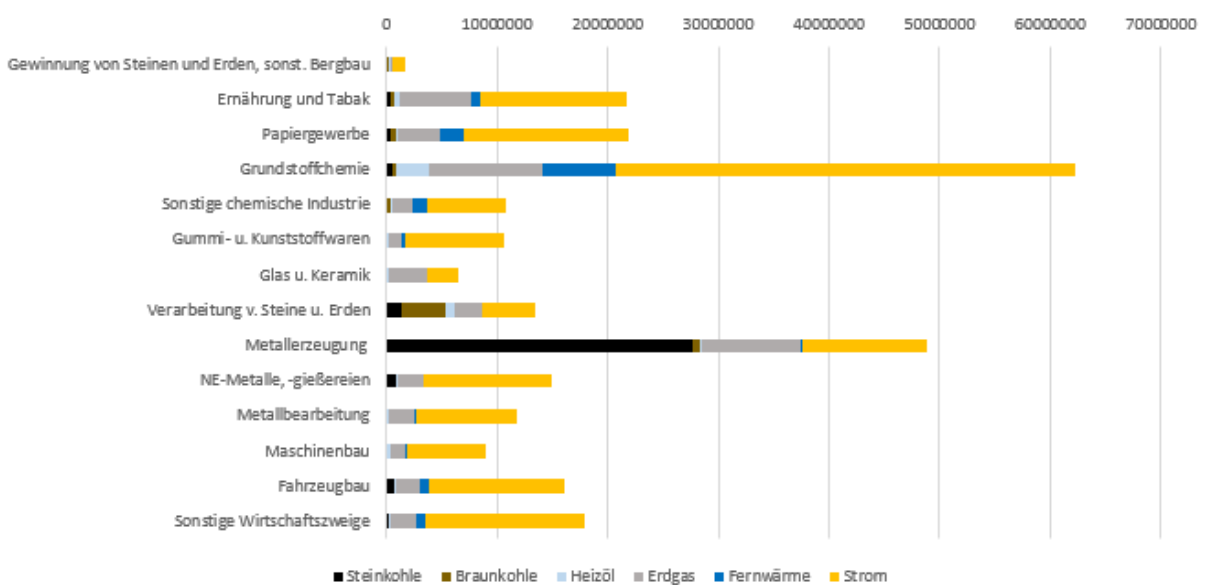
Ein weiterer Indikator besonders energieintensiver Prozesse ist die Veranschaulichung der Temperaturniveaus. Hierbei wird deutlich, dass Prozesse mit hohen Temperaturniveaus vor allem in der Metallerzeugung und in der Grundstoffchemie, sowie in Teilen auch bei der Herstellung von Glas und Keramik und bei der Verarbeitung von Steinen und Erden herrschen. Dies spiegelt sich auch in den CO₂-Emissionen der Prozesse wieder. Eher weniger hohe Temperaturniveaus werden dabei in der Metallbearbeitung, im Maschinenbau und im Fahrzeugbau benötigt.

Abbildung 27: Prozesswärme mit Brennstoff in TWh nach Temperaturniveau und Sektoren im Jahr 2019, interne Berechnungen (Fraunhofer ISI, 2019)



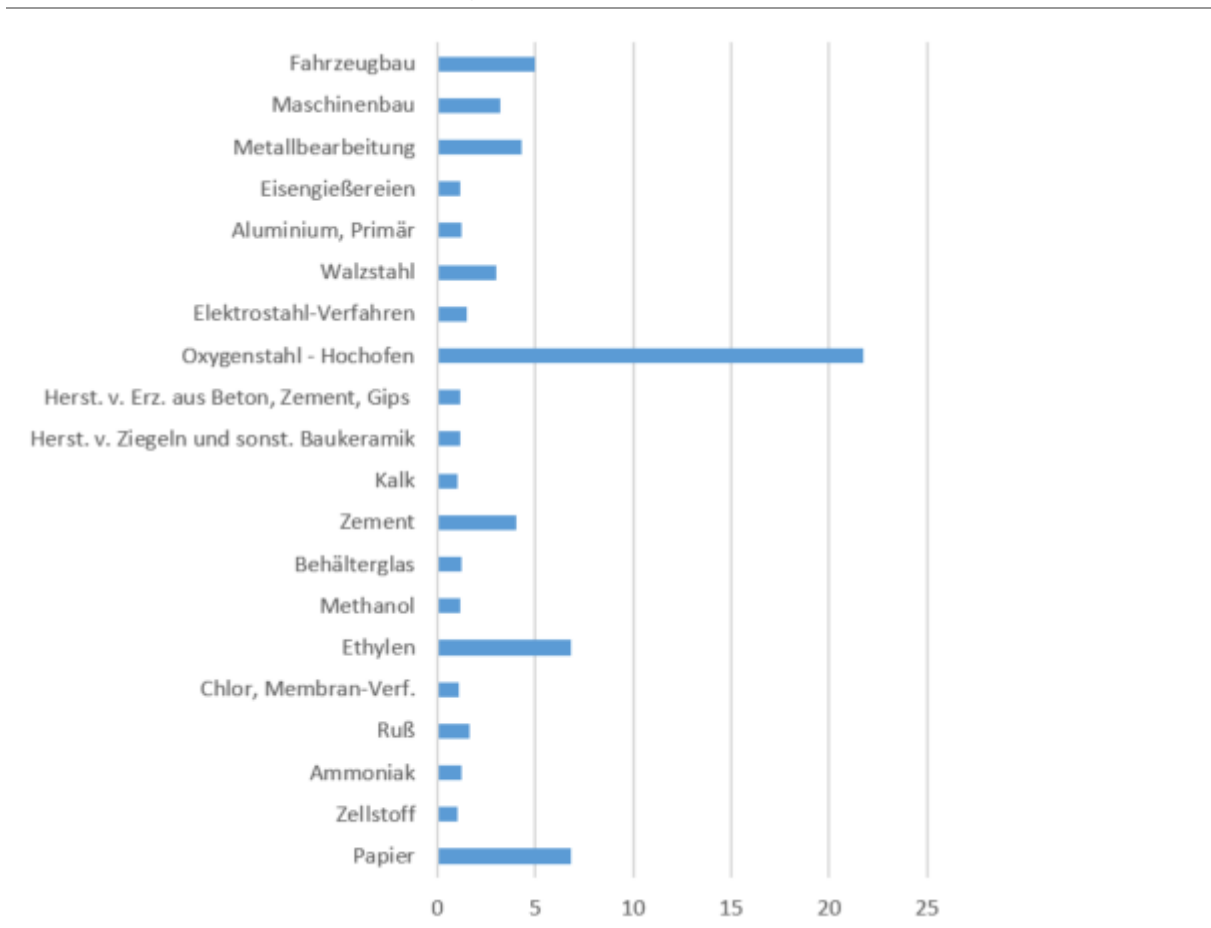
In Abhängigkeit von den Energieträgern und dem Energiebedarf sind in der folgenden Abbildung die Energieverbräuche in CO₂-Emissionen umgerechnet. Deutlich werden erneut die hohen CO₂-Emissionen in der Metallerzeugung, sowie in der Grundstoffchemie.

Abbildung 28: CO₂-Emissionen [t CO₂/GWh] der Energieträger 2019 (Umweltbundesamt, 2017), (Fraunhofer ISI, 2019)



Die folgende Abbildung zeigt interne Berechnungen über den prozentualen Anteil des Endenergieverbrauches ausgewählter Industriezweige und Prozesse am Gesamtenergieverbrauch der Industrie im Jahre 2019. Alle aufgeführten Prozesse oder Industriezweige haben einen Anteil am Endenergieverbrauch von über 1 %, die restlichen Prozesse und Industriezweige sind in der Abbildung nicht aufgeführt.

Abbildung 29: prozentualer Anteil des Endenergieverbrauches ausgewählter Industriezweige und Prozesse am Gesamtenergieverbrauch der Industrie 2019 [%], interne Berechnungen Fraunhofer ISI (Fraunhofer ISI, 2019)



Ausgehend von den Erkenntnissen über die Beschäftigungs- und Umsatzzahlen, sowie den Energiebedarfe und den daraus entstehenden CO₂-Emissionen werden exemplarische Prozesse ausgewählt um diese im weiteren Verlauf des Projektes genauer zu untersuchen und einen Carbon Monitoring Prozess zu starten.

5.3 Auswahl Prozesstechniken

Die Herausforderungsbereiche für die Auswahl möglicher Beispiel-Prozesstechniken sind:

- Relevanz, Komplexität und Übertragbarkeit;
- Abdeckung der strukturellen Breite der Industrie;
- Abdeckung energie- und prozessbedingter Emissionen
- Berücksichtigung direkter CO₂-Emissionen
- Batch-Prozesse
- Untersuchung der vor- und nachgelagerten Ketten
- Recycling-Prozesse

Im Hinblick auf die Herausforderungsbereiche und die Untersuchungen der Abbildungen aus Abschnitt 5.2 werden folgende Prozesse für eine Vorauswahl ausgesucht.

Tabelle 12: Eingrenzung ausgewählter Prozesstechniken zur Demonstration

| Prozess | Grund der Wahl |
|--------------------------------------|---|
| Herstellung von Ammoniak | Relevanz → starker Wachstumsmarkt |
| Herstellung von Ethylen | Untersuchung vor- und nachgelagerter Ketten |
| Zementherstellung | Relevanz |
| Primäraluminiumherstellung | Untersuchung direkte CO ₂ -Emissionen |
| Stahlerzeugung mit Hochofen | Relevanz |
| Stahlerzeugung mit Elektrolichtbogen | Untersuchung von Batch-Prozessen und Recyclingprozessen |
| Glaserstellung | Untersuchung von Recyclingprozessen |

Auf Basis dieser Vorauswahl und um einen möglichst breiten Spektrum abzudecken werden im weiteren Verlauf Unternehmen in der Stahlherstellung und Zementherstellung, sowie aus der chemischen Industrie Unternehmen in der Ammoniakherstellung kontaktiert.

6 **Arbeitspaket 4: Rückkopplung mit Unternehmen und Gewinnung von Demonstrationspartnern**

Autoren: Ratjen, Georg; Grabowski, Knut

6.1 **Hintergrund, Zielsetzung und Vorgehen**

In den Arbeitspaketen 2 und 3 wurden die methodische Herausforderungen des Carbon Monitorings bei komplexen Prozesstechniken benannt. Ferner wurde eine Auswahl an Prozesstechniken eingegrenzt, für die spezifische Ansätze zum Carbon Monitoring als Teil der Investitionsplanung von Unternehmen abgeleitet werden sollten.

In Arbeitspaket 4 war das Ziel, die Erkenntnisse zu den Herausforderungen beim Carbon Monitoring und dem verursachungsgerechten Energie- und CO₂-Kostencontrolling um Inputs der Unternehmen anzureichern, welche die ausgewählten Prozesse in der Praxis betreiben. Ferner sollten die Unternehmen zur Etablierung eines Carbon Monitorings und der verursachungsgerechten Zuordnung von Energie- und CO₂-Kosten motiviert werden.

Im Rahmen der angestrebten Arbeiten konnten drei Unternehmen aus den Branchen „Zementindustrie“, „Chemieindustrie“ und „Stahlindustrie“ gewonnen werden.

Im Anschluss führten Georg Ratjen, Knut Grabowski und in der chemischen Industrie auch Dr. Nathanael Harfst mit diesen Unternehmen Workshops durch, um gemeinsam Vorteile und Konzepte zur Einführung von Carbon Monitoring für ihre Dekarbonisierungsvorhaben zu skizzieren und die identifizierten Herausforderungen für die ausgewählten Prozesstechniken zu konkretisieren.

Folgende Resultate wurden zum Abschluss des Arbeitspakets 4 erzielt:

- Es wurden im Rahmen von ersten Ansätze für Carbon Monitoring und Carbon Costs Controlling bezogen die Prozesstechniken skizziert (Fotodokumentation Pinnwände) und jeweilige Herausforderungen benannt.
- Das Working Paper (angelegt in AP2) wurde bzgl. der Perspektiven der Unternehmen konkretisiert. Dadurch wurde sichergestellt, dass der Entwicklungsbedarf zur Kennzahlenmethodik die praktischen Erfordernisse in den Unternehmen widerspiegelt.
- Teilnehmende Unternehmen haben Interesse bekunden, die in den Wegweisern beschriebenen Vorgehensweisen auf ihre Demonstrationsvorhaben anzuwenden.

6.2 **Adjustierung und Anschreiben an die Unternehmen.**

In einem ersten Schritt wurden auf Basis der Ergebnisse aus AP 2 und 3 in Abstimmung mit dem BMWK Materialien für die Ansprache relevanter Unternehmen erarbeitet. Dafür wurden vorab die Vorteile von Carbon Monitoring und verursachungsgerechtem CO₂- und Energiekostencontrolling herausgearbeitet.

Im Zuge der Abstimmung wurde das Vorhaben adjustiert mit Blick auf einen stärkeren Fokus auf die Bilanzierung von CO₂-Einsparungen bei den Dekarbonisierungsprojekten.

Anschreiben: Carbon Monitoring und Carbon Costs Controlling: Effizienzüberwachung und Kostencontrolling für innovative, komplexe Produktionsprozesse

Die Dekarbonisierung der Industrie erfordert einen umfassenden Umbau der Produktionsverfahren. Dabei ist die Reduktion prozessbedingter Treibhausgasemissionen eine besondere Herausforderung. Im Zentrum innovativer Lösungsansätze stehen häufig die stoffliche Nutzung von Wasserstoff oder andere tiefgreifende Technologiewechsel, die eine direkte Elektrifizierung ermöglichen. Für eine Dekarbonisierung müssen sie erneuerbare Energien nutzen. Diese sind in ihrer Kapazität jedoch begrenzt. Eine effiziente und flexible Verwendung ist für die Dekarbonisierung unerlässlich. Innovative Prozesse, die z. B. im Programm „Dekarbonisierung in der Industrie“ entwickelt werden, gilt es effizient zu betreiben. Kontinuierliche Effizienzüberwachung mit dynamischen Soll-Werten hilft bei der Optimierung.

Im Vorhaben „Carbon Monitoring und Carbon Costs Controlling“ möchten wir mit Unternehmen der energieintensiven Industrien Ansätze für die Realtime Effizienzüberwachung der geplanten, innovativen Prozesse entwickeln. In interaktiven Workshops wenden wir die bewährte, von ÖKOTEC entwickelte „Methodik für Energiekennzahlen“ und Erkenntnisse aus dem Vorhaben „Realtime Carbon Footprint“ auf ausgewählte Prozesstechniken an. Wir betrachten dabei auch komplexe Batch-Prozesse und vernetzte Verfahren, wo die Herausforderungen bei der Effizienzüberwachung mit dynamischen Soll-Werten besonders groß sind. Die Ergebnisse konsolidieren wir in einem Einführungsplan. Darüber hinaus geben wir Hinweise zur Ermittlung OPEX-bezogener CO₂-Vermeidungskosten (wichtig z. B. für Carbon Contracts for Difference CCfDs) und zur Abbildung im betriebswirtschaftlichen Controlling.

Ablauf des Vorhabens

- Systemgrenzen der zu betrachtenden Prozesse
- Herausforderungen der dynamischen Soll-Wert-Überwachung
- Lösungsansätze zur dynamischen Soll-Wert-Überwachung
- Einführungsplan zur dynamischen Soll-Wert-Überwachung

Unser Angebot und Ihre Vorteile

- Gemeinsame Skizzierung praxistauglicher Lösungen in Workshops mit unseren Experten/innen
- Einführungsplan für dynamische Sollwert-Überwachung für Ihre innovative Prozesstechnik
- Ansätze zur Ermittlung plausibler CO₂-Vermeidungskosten
- Herangehensweisen zur Integration im betriebswirtschaftlichen Controlling
- Konzeption möglicher Folgevorhaben zur Umsetzung, die auf die Ergebnisse aufbauen

Die Teilnahme an diesem Vorhaben ist wertvoll und für Sie kostenfrei. Der Eigenanteil besteht in Ihrer engagierten Mitarbeit bei der Skizzierung der Lösungsansätze. Erst im Rahmen klar abgegrenzter, möglicher Folgevorhaben wird die Frage der Kofinanzierung für uns relevant.

Kontakt zu Georg Ratjen, ÖKOTEC: E-Mail: g.ratjen@oekotec.de Tel: 030 53 63 97 - 11

Unterstützerschreiben des BMWK: Betreff: Teilnahme an Vorstudie Carbon Monitoring und Carbon Costs Controlling

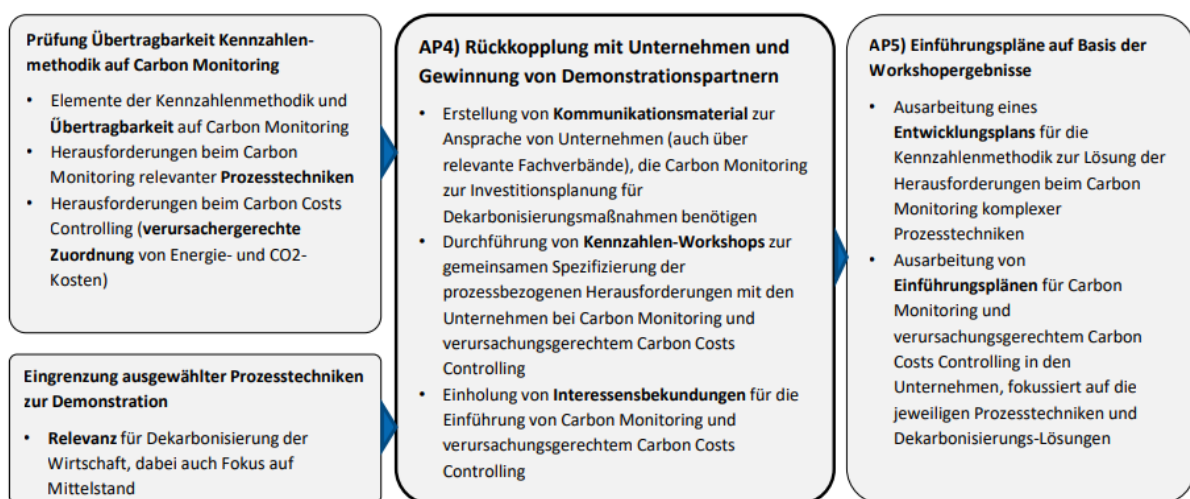
Zur Evaluierung des Erfolges einer Investition in die Dekarbonisierung, insbesondere im Fall einer staatlichen Förderung, ist ein transparentes und zuverlässiges CO₂-Monitoring notwendig, das auf einer einheitlichen und praktikablen methodischen Vorgehensweise beruht. Darüber hinaus ist für die effiziente Nutzung Erneuerbarer Energien ein dauerhaft optimierter und netzdienlicher Betrieb der dekarbonisierten Prozesse von großer Bedeutung. Das BMWK fördert die Vorstudie „Carbon

Monitoring und Carbon Costs Controlling“, die dazu beiträgt, die Grundlagen für ein effektives Monitoring zu legen. Sie baut auf die von der ÖKOTEC Energiemanagement GmbH entwickelte Kennzahlenmethodik auf, die bereits erfolgreich auf Monitoring und Benchmarking kontinuierlicher Prozesse in der Industrie angewendet wurde. Die gute Praxistauglichkeit und der hohe unternehmerische Mehrwert bei den Industriepartnern wurden vom Fraunhofer ISI im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung bestätigt. Um die Studie erfolgreich durchführen zu können, ist eine Mitwirkung der energieintensiven Industrie zentral. Eine Teilnahme bietet die Möglichkeit, Lösungsansätze für Carbon Monitoring komplexer Batch-Prozesse mitzugestalten, Einführungsfahrpläne zu entwickeln und Anknüpfungspunkte an das betriebswirtschaftliche Controlling zu identifizieren. Das BMWK würde daher eine Teilnahme an dem Prozess empfehlen und diese sehr begrüßen

6.1 Präsentation des Vorhabens und Teilnahmeerklärungen

Im Anschluss wurde das Vorhaben bei den Industriepartnern in Online-Konferenzen vorgestellt und Rückfragen und der Untersuchungsgegenstand geklärt. Dabei wurde den Unternehmen der für sie relevante Ausschnitt des Vorhabens vorgestellt.

Abbildung 30: Vereinfachter Überblick in Online-Präsentationen



Quelle: eigene Darstellung (ÖKOTEC)

Der Ablauf am Vorhaben wurde in drei Phasen unterteilt:

- 1) Vorbereitung der Workshops
 - Vertraulichkeitsvereinbarungen
 - Terminabstimmungen und Teilnehmer
 - Sichtung existierender Prozessbeschreibungen Material
- 2) Durchführung der Workshops
 - Herangehensweise Kennzahlenmethodik
 - Systemgrenzen der Prozesse
 - Skizzierung erste Stoff- und Energiestromschemata, Nutzen-Aufwand Schemata
 - Herausforderungen für Auswertung von CO₂-Einsparungen
 - Herausforderungen für kontinuierliche Effizienzoptimierung

- Erste Lösungsansätze
- 3) Nachbereitung der Workshops
 - Konsolidierung zu Einführungsplänen im Rahmen
 - Grundlage für ein anschließendes Hauptprojekt

Im Zuge der Abstimmungen zeigte sich, dass die Unternehmen großen Wert auf Kundenschutzvereinbarungen legen und die entstehenden Wegweiser erst nach Freigabe zugänglich gemacht werden sollen. ÖKOTEC unterzeichnete mit den Teilnehmern entsprechende Dokumente. Diese Vereinbarung soll dem Schutz vertraulicher Informationen, die zwischen den Vertragsparteien ausgetauscht wird, dienen. Die Regelungen werden im Rahmen des Berichtes anbei geteilt, um ähnlich gelagerte Projekte zu vereinfachen.

6.2 Ergebnisse der Workshops

ÖKOTEC führte bei den Praxispartnern mehrere Workshops mit den Dekarbonisierungsverantwortlichen durch. In vielen Fällen waren auch die Controller und Klima- und Energiemanager anwesend. In der Chemieindustrie nahm neben Georg Ratjen und Knut Grabowski aufgrund des Bedarfs an kaufmännischen Controlling-Themen Herr Dr. Nathanael Harfst teil. Durch die Bündelung der Kennzahlenkompetenz und der Prozesskenntnis in den Unternehmen konnten in allen teilnehmenden Unternehmen Konzepte zur Auswertung der CO₂-Einsparungen entwickelt und Erkenntnisse zur Investitionsplanung mit Blick auf maximale Anlageneffizienz gesammelt werden. Diese Ergebnisse wurden in weiteren Terminen vertieft und in Einführungsplänen verschriftlicht. Aufgrund ihres Charakters als Orientierung für Hauptprojekte wurden diese Einführungspläne als Wegweiser zum Carbon Monitoring formuliert.

6.3 Erkenntnisse

Während der Abstimmungen zum Vorhaben wanderte die Verantwortlichkeit für dieses Projekt vom BMUV in das BMWK. Es gelang eine nahtlose Übergabe und die Übernahme der Abstimmungsergebnisse. Die Unterstützerschreiben waren sehr hilfreich bei der Gewinnung der Teilnehmenden Unternehmen.

Die Ergebnisse des Arbeitspakets 3 waren hilfreich für eine zielgenaue Ansprache.

Aufgrund COVID 19 konnten die Workshops erst mit Verspätung durchgeführt werden, was den Vorhabenablauf insgesamt verzögerte. Ferner führte die Energiekrise im Jahr 2022 im Konzern eines teilnehmenden Unternehmensstandorts zu Produktionseinschränkungen.

Die Ergebnisse der Workshops wurden an Pinnwänden und Flipcharts dokumentiert. Es zeigte sich, dass sich die Einführungspläne aus dem EnPI-Connect Projekt gut eignen, um die Kennzahlenmethodik in einem Workshopformat auf die Dekarbonisierungsprojekte anzuwenden.

7 **Arbeitspaket 5: Erstellung von Wegweisern für Carbon Monitoring der Dekarbonisierungsprojekte**

Autoren: Ratjen, Georg; Grabowski, Knut; Dr. Harfst, Nathanael

7.1 **Hintergrund, Zielsetzung und Vorgehen**

Mit Abschluss des Arbeitspakets 4 wurden gemeinsam mit den teilnehmenden Unternehmen Konzepte zum Carbon Monitoring ihrer Dekarbonisierungsprojekte entwickelt. Ferner standen aus dem Arbeitspaket 2 Erkenntnisse zum Entwicklungsbedarf der Kennzahlenmethodik zur Verfügung. Im Verlauf des Arbeitspakets 5 arbeitete ÖKOTEC gemäß dem Entwicklungsbedarf einen Entwicklungsplan aus. Dieser beschreibt die notwendigen Entwicklungsarbeiten für die Umsetzung zuverlässiger Carbon Monitoring Systeme, die sich neben der Erfolgskontrolle von Dekarbonisierungs-Projekten auch für die Anlagenüberwachung der dekarbonisierten Prozesse eignen. Auf Grundlage der Ergebnisse aus dem Arbeitspaket 2 wurden „Wegweiser zum Carbon Monitoring“ ausgearbeitet. Bei allen teilnehmenden Partnern konnte eine einheitliche Vorgehensweise gewählt werden, die dem Vorgehen aus dem EnPI-Connect Projekt entspricht und in Unternehmen unterschiedlicher Branchen und Größen bewährt hat. Folgende Resultate wurden angestrebt:

- Einführungspläne für Carbon Monitoring bei den Unternehmen.
- Entwicklungsplan für die Kennzahlenmethodik;
- Endbericht als konsolidierte Konzeptstudie

7.2 **Aufbau der Wegweiser zum Carbon Monitoring**

Die Wegweiser skizzieren die Erkenntnisse aus den Workshops zu den Systemgrenzen der Prozesstechniken als Nutzen-Aufwand-Schemata mit Anhaltspunkten zum Monitoringkonzept. Ferner wird die dekarbonisierte Technik im Soll-Zustand hinsichtlich Effizienz-Zielen betrachtet. Anstelle der Wegweiser seien hier die Gliederungen genannt:

1 Kurzüberblick zum Vorhaben

- 1.1 Dekarbonisierungsprojekt beim Industriepartner
- 1.2 Kennzahlenmethodik für Carbon Monitoring
- 1.3 Carbon Monitoring beim Dekarbonisierungsprojekt

2 Ansätze zur Ermittlung des PCFs des Wertprodukts im Sollzustand und der Unterschiede an CO₂-Emissionen im Vergleich zur Referenz

- 2.1 Ansätze für Systemgrenzen mit Nutzen und Aufwänden im Soll-Zustand
- 2.2 Ansätze für Systemgrenzen mit Nutzen und Aufwänden im Referenzzustand
- 2.3 Ansätze zur Ermittlung des PCFs (Cradle to Grave) des Wertprodukts im Soll-Zustand
- 2.4 Ansätze zur Ermittlung der Unterschiede an CO₂-Emissionen zwischen Soll- und Referenzzustand

3 Effizienz der neuen Anlagen im Betrieb

- 3.1 Nutzen, Aufwände und Einflussgrößen der dekarbonisierten Technik
- 3.2 Herausforderungen und Ansätze zur Bestimmung dynamischer Effizienzziele vor der Investition, je nach Betriebsbedingungen

3.3 Herausforderungen und Ansätze zur Nachverfolgung der Zielerreichung und zur fortlaufenden Effizienzoptimierung bei variablen Betriebsbedingungen

4 Zusammenfassung

Es wurde auf Grundlage der Kennzahlenmethodik jeweils ein Wegweiser entwickelt für ein Unternehmen aus dem Sektor:

- **Zementindustrie: Abscheidung unvermeidbarer CO₂-Emissionen und Substitutionswirkung in den Verwertungspfaden**

Der erarbeitete Wegweiser von ca. 20 Seiten beschreibt die Substitutionswirkung des abgetrennten CO₂ in den Verwertungspfaden und gibt Hinweise zur Ermittlung der CO₂-Vermeidung und der Ermittlung von Product Carbon Footprints. Der Wegweiser geht zudem auf die Behandlung im europäischen Emissionshandel bzw. in den zugehörigen DEHSt Leitfäden ein. Ferner wurden erste Ansätze zur Sicherstellung einer Maximalen Effizienz der dekarbonisierten Technik skizziert (Vereinbarung dynamischer Effizienzziele mit Lieferanten und Überprüfung; Schaffung der Grundlagen für fortlaufende Effizienzoptimierung).

- **Stahlindustrie: Umstellung von der Hochofenroute auf wasserstoffbasierte Direktreduktion (DRI)**

Der erarbeitete Wegweiser von ca. 15 Seiten beschreibt die CO₂-Vermeidungswirkung des DRI-Verfahrens im Vergleich zum Referenz-Prozess Hochofenroute. Ferner wurden Bedarfe zur Festlegung einer maximalen Effizienz der dekarbonisierten Technik formuliert (Vereinbarung dynamischer Effizienzziele mit Lieferanten und Überprüfung; Schaffung der Grundlagen für fortlaufende Effizienzoptimierung).

- **Chemieindustrie: Minimierung der Glykolsäureverluste in der Elektrodialyse**

Beim Industriepartner aus der Chemieindustrie stand die Regelungsoptimierung eines komplexen Batch-Prozesses im Fokus. Der erarbeitete Wegweiser von ca. 15 Seiten umfasst ein bereits fortgeschrittenes Messkonzept für die Berechnung von Optimierungsmodellen. Die Batch-Problematik für das Training statistischer Modelle (mangelnde Gleichzeitigkeit bei den vorliegenden Daten) konnte durch ein Konzept für laufende Probenentnahmen innerhalb des Batch Prozesses gelöst werden.

Die Wegweiser wurden nach Freigabe durch die Unternehmen an das BMWK zur internen Verwendung weitergegeben. Die Erkenntnisse sollten bei der Auswertung der CO₂-Einsparung der Dekarbonisierungsvorhaben Anwendung finden.

7.3 Erkenntnisse

Für jedes der teilnehmenden Unternehmen ergaben sich lohnende Erkenntnisse aus der Teilnahme. Die Wegweiser wurden als Workshopdokumentation im Berichtsformat übergeben. Bei zwei der teilnehmenden Unternehmen fokussierten die Konzepte stärker auf Bilanzierungsregeln entlang groß angelegter Dekarbonisierungsvorhaben in der Zementindustrie und Stahlindustrie. Beim teilnehmenden Unternehmen aus der Chemieindustrie standen die Modellierungskonzepte eines komplexen Produktionsprozesses im Vordergrund.

8 Abschlussveranstaltung Carbon Monitoring

Die Präsentation von Ergebnissen des Vorhabens Carbon Monitoring erfolgte im Rahmen der Arbeitsgemeinschaft Industrie der DENEFF am 14. Dezember 2022.

- Dr. Tatjana Ruhl: Carbon Contracts for Difference und Carbon Monitoring
- Prof. Dr. Clemens Rohde (Fraunhofer ISI): Resilienz durch Effizienz und Dekarbonisierung
- Georg Ratjen (ÖKOTEC Energiemanagement): Mit kalkulatorischen Preise für CO₂ die Dekarbonisierung und Resilienz in der Kosten- und Leistungsrechnung verankern

Abbildung 31: Impressionen aus der Abschlusspräsentation



Quelle: DENEFF

Dr. Tatjana Ruhl präsentierte Neuigkeiten zu den Klimaschutzverträgen und leitete zu Carbon Monitoring über. Prof. Dr. Clemens Rohde ging auf die Rolle der Dekarbonisierung bei der Steigerung der Resilienz der Wirtschaft ein. Georg Ratjen präsentierte als Teilergebnis von Carbon Monitoring das Management der kalkulatorischen Kosten für CO₂ bei der Investitionsbewertung. Herr Arne Stecher präsentierte die Wirkungen des Dekarbonisierungsvorhaben im Zementwerk Holcim Lägerdorf.

Die Gruppenarbeiten zeigten vor allem die Querbezüge zwischen der als Teilergebnis im Vorhaben Carbon Monitoring beschriebene Ermittlung kalkulatorischer Kosten für CO₂ für praktikable Klimaschutzverträge. Ferner wurde die technologieübergreifende Anwendbarkeit bei der Ermittlung von CO₂-Einsparungen auch bei komplexen Dekarbonisierungsvorhaben hervorgehoben. Über die Abschlussveranstaltung hinaus wurden Teilergebnisse in die DIN Ausschüsse eingebracht, u. a. im Kontext einer ISO 14002-3 Klimamanagementsysteme.

9 Aktualisierung der Leitfäden aus dem Vorgängervorhaben EnPI-Connect

Im Zuge des Vorhabens Carbon Monitoring wurden die Leitfäden und Trainingsfolien aus dem Vorgängervorhaben „EnPI-Connect – Erfassung, Monitoring und Benchmarking“ aktualisiert. Die Leitfäden sind aufgrund veränderter Zuständigkeiten nicht mehr beim BMUV verlinkt. Sie sind diesem Endbericht als Anhang beigefügt und sollten beim BMWK neu veröffentlicht werden, um sie weiter zu verbreiten und ihre dauerhafte Klimaschutzwirkung zu erhalten.

Abbildung 32: Aktualisierung der Leitfäden und Trainingsmaterialien aus dem Vorgängervorhaben EnPI-Connect



EnPI-Connect in der Praxis
aktualisiert im Rahmen des Vorhabens „Carbon Monitoring“

Teil I:  **Methodischer Überblick: Entwicklung, Vernetzung und Anwendung von Energiekennzahlen**

Erfassung des Energieflusses

- Kosten, Primärenergie, CO₂ entlang der Fertigungsschritte transparent machen

Monitoring

- Effizienz in Realtime überwachen und Frühwarnsysteme aufbauen
- Verbesserung der Energy Performance in Einklang mit ISO 50006 nachweisen
- Anlagen vorausschauend und am Bedarf warten (Predictive Maintenance)
- Wirksamkeit von Effizienzmaßnahmen und Erfolge beim Klimaschutz auswerten

Benchmarking

- Einsparpotenziale mittels Benchmarking mit anderen Anlagen quantifizieren
- Energieaufwand anderer Anlagen an eigenen Standortbedingungen simulieren
- Einsparpotenziale mittels statistischer Tiefenanalyse aufdecken
- Die Effizienz von Anlagen im Vergleich mit Bestanlagen absolut einschätzen

Autoren:
Georg Ratjen, Knut Grabowski, Carsten Ernst, Derek Williams (ÖKOTEC Energiemanagement GmbH)
Claire Range (DENEFF)
Dr. Clemens Rohde (Fraunhofer ISI)

Methodische Grundlage für die dargestellten Zusammenhänge in diesem Dokument ist Grabowski, Kubin, Ernst (2015): Abschlussbericht zur Kennzahlenmethodik

Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, unter dem Förderkennzeichen: UM21DC002

Ort: Berlin
Datum: 28.02.2023



EnPI-Connect in der Praxis
aktualisiert im Rahmen des Vorhabens „Carbon Monitoring“

Teil II:  **Einführungsplan: Energiekennzahlen für Erfassung, Monitoring und Benchmarking**

Schritt 1: Festlegung des Systems, der Ziele und Verantwortlichkeiten

| | | | |
|---------------------|-------------------------------------|--|--|
| Auswahl der Systeme | Auswahl der Ziele bei der Erfassung | Auswahl der Ziele bei Monitoring, Benchmarking | Festlegung von Verantwortlichkeiten (ggf. mit Support durch Data Center) |
|---------------------|-------------------------------------|--|--|

Schritt 2: Stoffstromschema **Schritt 3: Nutzen-Aufwand-Schema**

| | | | |
|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|---|
| Auswahl der Systemgrenzen | Entwicklung Stoffstrom-Schema | Entwicklung Nutzen-Aufwand-Schema | Bestimmung der externen Einflussgrößen (ExEG) |
|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|---|

Schritt 4: Daten- und Messkonzept

| | | | |
|--|---|---|---|
| Funktionen zur Berechnung der Nutzen und Aufwände aus Stoffströmen | Funktionen zur Berechnung der ExEG aus Stoffströmen | Eintragung Messstellen in Stoffstrom-Schema | Planung der Schnittstellen zur Software |
|--|---|---|---|

Schritt 5: Implementierung der Hardware und Software

| | | |
|-----------------------|--|---------------------------------------|
| Umsetzung Messstellen | Installation Effizienzcontrolling-Software | Umsetzung Schnittstellen zur Software |
|-----------------------|--|---------------------------------------|

Schritt 6: Einrichtung, Pflege und Anwendung des Effizienzcontrolling

| | | | | |
|-------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|---|--|
| Design Kennzahlen und Reports | Pflege und Dokumentation | Anwendung: Erfassung von Ist-Werten | Training von Baseline-Modellen aus Ist-Werten | Anwendung: Monitoring und Benchmarking |
|-------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|---|--|

■ = Notwendig zur Erfassung von Ist-Werten ■ = Zusätzlich für Monitoring und Benchmarking

Autoren:
Georg Ratjen, Knut Grabowski, Carsten Ernst, Derek Williams (ÖKOTEC Energiemanagement GmbH)
Claire Range (DENEFF)
Prof. Dr. Clemens Rohde (Fraunhofer ISI)

Methodische Grundlage für die dargestellten Zusammenhänge in diesem Dokument ist Grabowski, Kubin, Ernst (2015): Abschlussbericht zur Kennzahlenmethodik

Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, unter dem Förderkennzeichen: UM21DC002

Ort: Berlin
Datum: 28.02.2023

Einheitliche Kennzahlenmethodik im Auftrag Bundesministerien

Auftrags- bzw. Zuwendungsgeber der Projekte zur Kennzahlenmethodik



Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz



Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Projektkonsortium



ÖKOTEC
ENERGIEMANAGEMENT GMBH



DENEFF
DEUTSCHE UNTERNEHMENSINITIATIVE ENERGIEEFFIZIENZ



Fraunhofer
ISI

Anwendungspartner



Stockmeyer
STOCKMEYER GRUPPE



Mercedes-Benz
Werk Berlin



CityClean
Saubere Welt. Service. Plus.



Anschauliche Kurzbroschüren und Endbericht zur Kennzahlenmethodik:
<https://www.oekotec.de/energiekennzahlen>

Georg Ratjen / EnPI-Connect / ÖKOTEC Energiemanagement GmbH 6

Quelle: ÖKOTEC Energiemanagement GmbH

10 Fazit

Die Untersuchungen zeigen, dass **bestehende Normen und Studien noch keine ausreichende Orientierung** für das Carbon Monitoring bieten. Hintergrund ist vor allem, dass sie die Bilanzierung adressieren, aber keinen Vergleich zwischen einem Soll-Zustand und Referenz-Zustand beschreiben. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die bestehende und im Projekt EnPI-Connect in der Industrie (Mercedes Benz Marienfelde, Stockmeyer, City Clean) umfassend erprobte **Kennzahlenmethodik ohne Abstriche auf das Thema prozessbedingte CO_{2e}-Emissionen übertragbar** ist. Der Kurzleitfaden „EnPI-Connect in der Praxis – Energiekennzahlen für Monitoring und Benchmarking“, der in der Wirtschaft eine hohe Verbreitung gefunden hat, ließ sich vollständig in einen Leitfaden für „Product Carbon Footprints und Product Carbon Costs - Überblick: Erfassung, Monitoring und Benchmarking von CO_{2e}-Emissionen und CO_{2e}-Kosten auf Produktebene“ überführen. Dieser ist **sowohl für prozessbedingte als auch energiebedingte CO₂-Emissionen anwendbar**. Der zusätzliche Kurzleitfaden „Steuerung von Carbon-Costs in bestehenden Controlling- und Kostenrechnungssystemen“ spricht **zudem das betriebswirtschaftliche Controlling** an.

Im Rahmen der Arbeiten wurde der Kurzleitfaden „Product Carbon Footprints und Product Carbon Costs - Überblick: Erfassung, Monitoring und Benchmarking von CO_{2e}-Emissionen und CO_{2e}-Kosten auf Produktebene“ **auf drei konkrete Dekarbonisierungsvorhaben in der energieintensiven Industrie angewendet**. Die drei entstandenen Wegweiser beschreiben Ansätze zur Ermittlung der Dekarbonisierungswirkung in drei Unternehmen.¹⁹

- Wegweiser 1: Zementindustrie: Abscheidung unvermeidbarer CO₂-Emissionen und Substitutionswirkung in den Verwertungspfaden
- Wegweiser 2: Stahlindustrie: Umstellung von Hochofenroute auf Direktreduktion (DRI) mit H₂
- Wegweiser 3: Chemieindustrie: Minimierung der Glykolsäureverluste in der Elektrodialyse durch modellbasierte Effizienzoptimierung

Die Wegweiser sind in ihrer Struktur identisch und folgen einer einheitlichen Logik. Es wird jeweils das System im Soll-Zustand (nach der Dekarbonisierungsmaßnahme) mit dem System im Referenz-Zustand (welches substituiert wird) verglichen. Wo sich die Dekarbonisierungswirkung über mehrere Verwertungspfade erstreckt, sind die Systemgrenzen im Referenz-Zustand auf diejenigen Produkte ausgeweitet, die substituiert werden. Für die dekarbonisierte Technik sind jeweils Anforderungen an Messkonzepte beschrieben, welche die Grundlage für die Überprüfung der Erreichung von Effizienzzielen und der fortlaufenden Verbesserung im operativen Betrieb dienen. Die Ansätze sollten im Rahmen von nachfolgenden Projekten stärker detailliert werden.

Carbon Monitoring und Carbon Costs Controlling erscheint insgesamt als geeignete einheitliche Methodik zur Auswertung von CO₂-Einsparungen bei sämtlichen Dekarbonisierungsvorhaben. Die zugrundeliegenden Leitfäden aus dem EnPI-Connect Vorhaben werden intensiv in der Industrie angewendet werden. Die **Praxispartner hatten den Leitfäden eine sehr gute Verständlichkeit und Anwendbarkeit** bescheinigt. Da der Leitfaden „Product Carbon Footprints und Product Carbon Costs - Überblick: Erfassung, Monitoring und Benchmarking von CO_{2e}-Emissionen und CO_{2e}-Kosten auf Produktebene“ sehr nah an den EnPI-Connect Leitfäden formuliert ist, kann auch hier von einer guten Verständlichkeit und Akzeptanz ausgegangen werden.

¹⁹ Diese sind aufgrund noch ausstehender Freigabe noch nicht namentlich genannt.

11 Handlungsempfehlungen

- **Nutzung der Carbon Monitoring Methodik als Rahmen für die Auswertung von CO₂-Einsparungen von Dekarbonisierungsprojekten nach einheitlichen Kriterien**

Die Carbon Monitoring Methodik bietet für Fördermittelgeber die Möglichkeit, die Reduktion von CO₂-Emissionen bei geförderten Dekarbonisierungsprojekten auf einer einheitlichen methodischen Grundlage auszuwerten. Die Nutzung könnte zu diesem Zweck evtl. in Förderrichtlinien Eingang finden, einer Einbeziehung sollte eine Konsultation mit relevanten Stakeholdern und den Autoren dieser Arbeiten vorausgehen. Im Resultat könnten Fördermittelgeber einheitliche Vorgehensweisen bei den Dekarbonisierungsvorhaben zur Auswertung der CO₂-Einsparungen ansetzen, um die Ergebnisse von Reduktionsvorhaben nachvollziehbar an die prüfenden Stellen zu übermitteln.

- **Weiterentwicklung der entstandenen Wegweiser**

Die entstandenen Wegweiser für die drei Unternehmen aus der Zement-, Stahl- und Chemieindustrie beschreiben umfassende Ansätze zum Carbon Monitoring. Sie folgen allesamt der einheitlichen Carbon Monitoring Methodik, die von der Kennzahlenmethodik abgeleitet wurde. Die Ansätze sollten im Rahmen der Dekarbonisierungsprojekte weiter spezifiziert und bei einer Umsetzung kontinuierlich verfolgt werden.

- **Kennzahlenkataloge für verbreitete Prozesstechniken**

Die Kennzahlenmethodik, die in mehreren Vorhaben entwickelt und auf Praxistauglichkeit geprüft wurde, sollte in der Industrie weiterverbreitet werden. Die Identifizierung der bestimmenden Einflussgrößen von Prozessen stellt für Industrieunternehmen einen hohen Aufwand dar. An dieser Stelle können einheitliche Kennzahlenkataloge helfen, die für eine Vielzahl verbreiteter Branchentechniken vordefinierte Einflussgrößen zur Modellierung von Baselines auflisten. Die Baselines können für Effizienzüberwachung, Predictive Maintenance und Frühwarnsysteme bei Effizienzabweichung und zur fortlaufende Effizienzoptimierung genutzt werden.

- **Aktivierung des betriebswirtschaftlichen Controllings für die Dekarbonisierung**

Das betriebswirtschaftliche Controlling ist meist nur am Rande bei Themen der Dekarbonisierung und Energieeffizienzsteigerung eingebunden. „Carbon Monitoring“ ermöglicht mittels Vernetzung von Kennzahlen die verursachergerechte Zuteilung von CO₂-Emissionen. Der Kurzleitfaden „Steuerung von Carbon-Costs in bestehenden Controlling- und Kostenrechnungssystemen“ zeigt, wie auf Basis der internen Kostenverrechnung die Unterschiede in den Systemgrenzen zwischen betriebswirtschaftlichem und technischem Controlling überbrückt werden können. Bedarf besteht vor allem in der Interoperabilität der verschiedenen Softwarelösungen im betriebswirtschaftlichen und technischen Effizienzcontrolling. Ein Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, dass sich die Einbeziehung von Controllern u. a. bei der Effizienzüberwachung zum Ziel setzt, sollte die Entwicklung frei nutzbarer Schnittstellen zum Gegenstand haben, um die im betriebswirtschaftlichen Controlling verbreiteten Software-Lösungen mit leistungsfähigen Effizienzcontrolling-Lösungen zu koppeln und diese Schnittstellen erproben.

- **Neuveröffentlichung der Leitfäden aus EnPI-Connect beim BMWK**

Im Zuge der Neuorganisation der Themen zwischen dem BMWK und dem BMUV sind Pressemeldungen mit Links zu den EnPI-Connect Leitfäden gelöscht worden. Die Leitfäden wurden im Zuge des Vorhabens aktualisiert. Um die dauerhafte Klimaschutzwirkung auch des EnPI-Connect Projekts zu gewährleisten, sollten die dort entstandenen und im Rahmen des Vorhabens Carbon Monitoring aktualisierten Materialien beim BMWK neu veröffentlicht werden.

12 **Abbildungsverzeichnis**

| | | |
|---------------|---|----|
| Abbildung 1: | Übersicht der Arbeitspakete..... | 10 |
| Abbildung 2: | Unterscheidung der Emissionen..... | 14 |
| Abbildung 3: | Vergleich "Bottom-up" und "Top-down" Methode..... | 15 |
| Abbildung 4: | System mit Nutzen und Aufwand..... | 24 |
| Abbildung 5: | Externe Einflussgrößen der Systemumwelt..... | 24 |
| Abbildung 6: | Vernetzung von Systemen anhand von Bewertungsfaktoren..... | 25 |
| Abbildung 7: | Nutzen-Aufwand-Schema Wärmeerzeugung..... | 26 |
| Abbildung 8: | Nutzen-Aufwand-Schema: Zementklinkerherstellung mit CO ₂ - Verwertung..... | 27 |
| Abbildung 9: | Nutzen-Aufwand-Schema: Zementklinkerherstellung ohne CO ₂ - Verwertung..... | 28 |
| Abbildung 10: | Visualisierungsbeispiele einer Auswahl an Kennzahlen..... | 29 |
| Abbildung 11: | Visualisierungsbeispiel der Kennzahlen..... | 31 |
| Abbildung 12: | Effizienzüberwachung mit Frühwarnung..... | 32 |
| Abbildung 13: | Effizienzbewertung: Benchmarking von Kompressoren..... | 34 |
| Abbildung 14: | Ermittlung eines statistischen Zusammenhangs zwischen Aufwand, Nutzen und relevanten externen Einflussgrößen..... | 35 |
| Abbildung 15: | Auswertung der Effizienzveränderungen..... | 36 |
| Abbildung 16: | Lösungsansätze bei mehreren Nutzen:..... | 38 |
| Abbildung 17: | Systemerweiterung..... | 38 |
| Abbildung 18: | Systemunterteilung..... | 39 |
| Abbildung 19: | Systeme mit gekoppelten Nutzen..... | 40 |
| Abbildung 20: | Übersicht Kostenerfassung und- verteilung..... | 49 |
| Abbildung 21: | Beispielhafte Struktur zur Verrechnung innerbetrieblicher Leistungen..... | 50 |
| Abbildung 22: | Erweiterung der Kosten und Leistungsrechnung zur Emissionsrechnung..... | 51 |
| Abbildung 23: | Kostenstellenstruktur Beispiel..... | 53 |
| Abbildung 24: | Beschäftigte der Industrie-Wirtschaftszweige 2019 (Destatis, 2020)..... | 58 |
| Abbildung 25: | Jahresumsatz der Industrie-Wirtschaftszweige 2019 in Mio € (Destatis, 2020)..... | 58 |
| Abbildung 26: | Industrieller Endenergieverbrauch [TJ] der Wirtschaftszweige 2019 (Fraunhofer ISI, 2019)..... | 59 |
| Abbildung 27: | Prozesswärme mit Brennstoff in TWh nach Temperaturniveau und Sektoren im Jahr 2019, interne Berechnungen (Fraunhofer ISI, 2019)..... | 60 |
| Abbildung 28: | CO ₂ -Emissionen [t CO ₂ /GWh] der Energieträger 2019 (Umweltbundesamt, 2017), (Fraunhofer ISI, 2019)..... | 60 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 29: prozentualer Anteil des Endenergieverbrauches ausgewählter Industriezweige und Prozesse am Gesamtenergieverbrauch der Industrie 2019 [%], interne Berechnungen Fraunhofer ISI (Fraunhofer ISI, 2019) | 61 |
| Abbildung 30: Vereinfachter Überblick in Online-Präsentationen..... | 65 |
| Abbildung 31: Impressionen aus der Abschlusspräsentation..... | 69 |
| Abbildung 32: Aktualisierung der Leitfäden und Trainingsmaterialien aus dem Vorgängervorhaben EnPI-Connect..... | 70 |

13 Tabellenverzeichnis

| | | |
|-------------|--|----|
| Tabelle 1: | Exkurs: Wasserstoff "Farbenlehre" | 12 |
| Tabelle 2: | Übersicht der Carbon Monitoring Methoden | 16 |
| Tabelle 3: | Anwendungsbereiche von Carbon Monitoring in Wirtschaftszweigen nach der Unterteilung des Statistischen Bundesamtes (Bundesamt, 2008)..... | 20 |
| Tabelle 4: | Anwendungsbeispiele von Carbon Monitoring..... | 22 |
| Tabelle 5: | Kosten- und Emissionsartenrechnung 2021 | 52 |
| Tabelle 6: | Kostenstellenbericht Dampferzeugung inkl. Emissionen – Leistungsart Dampf in kWh..... | 53 |
| Tabelle 7: | Kostenstellenbericht Instandhaltung inkl. Emissionen – Leistungsart Stunden | 54 |
| Tabelle 8: | Kostenstellenbericht Fertigung inkl. Emissionen..... | 54 |
| Tabelle 9: | Einzelkosten und -emissionen des Produkts 1 | 55 |
| Tabelle 10: | Einzelkosten und -emissionen des Produkts 2 | 55 |
| Tabelle 11: | Produktkalkulation mit Kosten und Emissionen..... | 55 |
| Tabelle 12: | Eingrenzung ausgewählter Prozesstechniken zur Demonstration | 62 |

Literaturverzeichnis

- European Parliament. (2021). *EU hydrogen policy - Hydrogen as an energy carrier for a climate-neutral economy*. Von [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/689332/EPRS_BRI\(2021\)68932_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/689332/EPRS_BRI(2021)68932_EN.pdf) abgerufen
- DEHSt. (2020). *Überwachungspläne in der 4. Handelsperiode*. Berlin: UBA.
- Destatis. (2020). *Produzierendes Gewerbe - Beschäftigte, Umsatz und Investitionen des verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden*. Statistisches Bundesamt.
- DFGE. (2013). *A New Approach for Executing an Ecological Assessment for Organisations - DFGE-TopDown Approach for the Carbon Footprint*. Institute for Energy, Ecology and Economy.
- DIN EN 16212. (2012). *Energieeffizienz- und einsparberechnung - Top-Down- und Bottom-Up-Methoden*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 16247-1. (2012). *Energieaudits - Teil1: Allgemeine Anforderungen*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN ISO 14040. (2006). *Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen*.
- DIN EN ISO 14044. (2021). *Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN ISO 14064-2. (2020). *Treibhausgase - Teil 2: Spezifikation mit Anleitung zur quantitativen Bestimmung, Überwachung und Berichterstattung von Reduktionen der Treibhausgasemissionen oder Steigerung des Entzugs von Treibhausgasen auf Projektebene*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN ISO 14067. (2019). *Treibhausgase - Carbon Footprint von Produkten - Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN ISO 50001. (2018). *Energiemanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung*. Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN ISO 50006. (2014). *Energiemanagementsysteme - Messung der energiebezogenen Leistung unter Nutzung von energetischen Ausgangsbasen (EnB) und Energieleistungskennzahlen (EnPI) - Allgemeine Grundsätze und Leitlinien*.
- DIN V 18599-1. (2016). *Energetische Bewertung von Gebäuden–Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- Dong, H., Geng, Y., Xi, F., & Fujita, T. (2013). *Carbon footprint evaluation at industrial park level: A hybrid life cycle assessment approach*. Energy Policy.
- Fraunhofer ISI. (2019). *Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2019*.
- Grabowski, K., Dr. Kubin, K., & Ernst, K. (2014). *Methodik zur Aufstellung von Energiekennzahlen*. Berlin: ÖKOTEC Energiemanagement.
- Greenhouse Gas Protocol. (14.06.2021). *GHG Protocol Calculation Tools*. Von https://ghgprotocol.org/calculation-tools#sector_specific_tools_id abgerufen

- Greenhouse Gas Protocol. (2011). *Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard*.
- Horváth, P., Gleich, R., & Seiter, M. (2015). *Controlling*. Vahlen.
- IKEM. (Dezember 2020). *Wasserstoff - Farbenlehre*. Von Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V. abgerufen
- IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.
- Islam, S., Ponnambalam, S., & Lam, H. (2016). Review on life cycle inventory: methods, examples and applications. *Journal of Cleaner Production* 136.
- Jiang, Q., Liu, Z., Li, T., Zhang, H., & Iqbal, A. (2014). Life Cycle Assessment of a Diesel Engine Based on an Integrated Hybrid Inventory Analysis Model. *21st CIRP Conference on Life Cycle* .
- Neelis, M., Worrell, E., Mueller, N., Angeli, T., Cremer, C., Schleich, J., & Eichhammer, W. (2009). *Developing Benchmarking Criteria for CO₂-Emissions*. European Commission.
- ÖKOTEC Energiemanagement GmbH. (2020). *CO₂realtime: Kennzahlen und Digitalisierung als enabler für CO₂-Reduzierung*.
- PAS 2050. (2011). Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services.
- Ratjen, G., Grabowski, K., & Dr. Rohde, C. (2020). *EnPI-Connect - Energiekennzahlen für Monitoring und Benchmarking*. Berlin, Karlsruhe: ÖKOTEC.
- Ratjen, G., Lackner, P., Kahlenborn, W., & Gsellmann, J. (2013). *Methodische Grundlagen für die Entwicklung von Energieeffizienz-Benchmarkingsystemen nach EN 16231*. Berlin, Wien: adelphi.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen. (Juni 2021). https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2020_2024/2021_06_stellungnahme_wasserstoff_im_klimaschutz.pdf?__blob=publicationFile&v=4.
- Sontag, B., Bender, O., Laubach, M., Rohde, C., Hirzel, S., Kloos, H., & Walkötter, R. (2014). *Energy-benchmarking within companies: insights from benchmarking practice*. ECEEE.
- Statistisches Bundesamt. (2008). *Klassifikation der Wirtschaftszweige*.
- Umweltbundesamt. (2017). *Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in der Zeitreihe 2005-2014*.
- Umweltbundesamt. (11.. März 2021). *Wasserstoff – Schlüssel im künftigen Energiesystem*. Von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/wasserstoff-schlüssel-im-kuenftigen-energiesystem#herstellung> abgerufen
- Weber, J., & Schäffer, U. (2011). *Einführung in das Controlling*. Stuttgart: 13. überarbeitete und aktualisierte Auflage.