Product Carbon Footprints und Product Carbon Costs

Überblick: Erfassung, Monitoring und Benchmarking von CO_{2e}-Emissionen und CO_{2e}-Kosten auf Produktebene

Anwendungsbeispiele

Erfassung

- Auswirkung von Dekarbonisierungsvorhaben auf CO_{2e} -Emissionen nachvollziehen
- Kalkulatorische Kosten für CO_{2e} ermitteln und in der Investitionsplanung ansetzen

Monitoring

- 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)

Benchmarking

- 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 absolut einschätzen

Georg Ratjen, Knut Grabowski, Dr. Nathanael Harfst

Die Darstellung folgt in ihrer Struktur den Leitfäden aus dem Vorhaben EnPI-Connect (2020). Methodische Grundlage ist der Abschlussbericht zur Kennzahlenmethodik (2015)

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

Ort: Berlin, Karlsruhe

Datum: 28.02.2023

Inhalt

1 Hintergrund: Product Carbon Footprints (PCFs) und Costs (PCCs) 3

2 Produktionsprozesse als Systeme mit Nutzen und Aufwänden 4

3 Erfassung von Product Carbon Footprints (PCFs) und Costs (PCCs) 5

3.1 Grundlagen und Formelsammlung 5

3.2 Beispiel: PCFs und PCCs bei der Wärmeerzeugung 6

3.3 Beispiel: Vergleich der Product Carbon Footprints zwischen konventioneller und innovativer Zementproduktion 7

3.4 Visualisierungsbeispiele der Kennzahlen in der „Erfassung“ 9

4 Monitoring von PCFs und PCCs: Vergleich mit der Baseline 10

4.1 Grundlagen 10

4.2 Visualisierungsbeispiele der Kennzahlen im „Monitoring“ 11

4.3 Beispiel für Monitoring: Effizienzüberwachung mit Frühwarnung 12

5 Benchmarking von PCFs und PCCs: Vergleich mehrerer Systeme 13

5.1 Grundlagen 13

5.2 Beispiel für Effizienz-Bewertung: Benchmarking von Kompressoren 14

Annex I: Modellierung für das Monitoring 15

Annex II: Modellierung für das Benchmarking 17

Annex III: Umgang mit Systemen, die mehrere Nutzen produzieren 18

Annex IV: Kalkulatorische Kosten für CO_{2e}: Dekarbonisierung in der Kosten- und Leistungsrechnung verankern 20

1 Hintergrund: 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. 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 zur internen CO_{2e} -Bepreisung, 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}-bedingen 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 CO_2-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.

2 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.

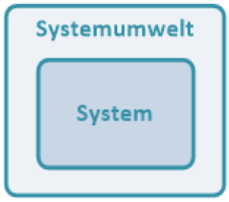
Abbildung 1: System mit Nutzen und Aufwand

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).[1] 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")[2].

Bei einer Kälteanlage besteht der Nutzen in der Erzeugung von Kälte. Der Nutzen setzt sich aus seiner Nutzengröße und seinen Eigenschaften zusammen. Die **Nutzengröße** kennzeichnet die Menge und Einheit, in der der Nutzen quantifiziert werden kann. Bei der Kälteerzeugungsanlage kann eine Nutzengröße 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 Kälteträger 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 2: 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

[1] 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.

[2] „Gate to Grave" ist z. B. relevant, wenn Maßnahmen die Reduktion von CO_2-Emissionen bei der Verwendung betreffen (z. B. „Design for Recylce")

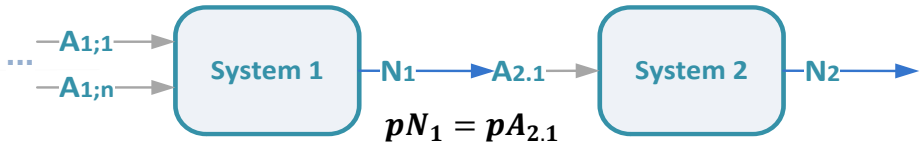
3 Erfassung von Product Carbon Footprints (PCFs) und Costs (PCCs)

3.1 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).[3] 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.[4] 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: $\boldsymbol{pN_1}$, z. B. tCO_{2e} pro Stück).

Abbildung 3: Vernetzung von Systemen anhand von Bewertungsfaktoren

$$\boldsymbol{AB_1 = pA_{1.1} * A_{1.1} + \ldots + pA_{1.n} * A_{1.n} = pN_1 * N_1}$$



Quelle: eigene Abbildung

Der Product Carbon Footprint bzw. die Product Carbon Costs ($hier$: $\boldsymbol{pN_1}$) werden bei nachfolgenden Systemen als CO_{2e}-Emissionsfaktoren bzw. CO_{2e}-Kostenfaktoren für die Aufwände ($hier$: $\boldsymbol{pA_{2.1}}$) 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 Gemeinkostenzuschlagsätzen 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 $\mathbf{N_a}$ *(PCF: Product Carbon Footprint bzw. PCC: Product Carbon Costs)*
$A_{a.t}$	Ein Aufwand **t** für die Erzeugung des Nutzens $\mathbf{N_a}$
$pA_{a.t}$	Bewertungsfaktor für diesen Aufwand *(CO_{2e}-Emissionsfaktor bzw. CO_{2e}-Kostenfaktor)*
AB_a	Der bewertete Aufwand zur Erzeugung des Nutzens $\mathbf{N_a}$ *(hier: CO_{2e}-Emissionen bzw. CO_{2e}-Kosten)*

[3] CO2e Preise sind müssen nicht unbedingt zahlungswirksam sein. Setzen Sie kalkulatorische CO2e-Preise an, um z. B. mit Blick auf Klimastrategie oder Risikomanagement Dekarbonisierungsmaßnahmen in der Investitionsrechnung besserzustellen (vgl. Annex I).

[4] 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).

3.2 Beispiel: PCFs und PCCs bei der Wärmeerzeugung

Abbildung 4: 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 CO2e-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 CO2e enthalten ist (30€ pro Tonne CO2e), wird Biogas nicht vom Brennstoffemissionshandelsgesetz erfasst. Für seine Investitionsentscheidungen möchte der Betreiber jedoch aufgrund seiner Zukunftserwartungen einen einheitlichen kalkulatorischen CO2e-Preis von 100 Euro 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.[5]

CO2e- Emissionen für die erzeugte Wärme

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

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

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

CO2e-Kosten auf Grundlage aktueller CO2e-Preise (hier: gemäß BEHG)

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

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

Zusätzliche kalkulatorische CO2e-Kosten zum Differenzausgleich zum kalkulatorischen CO2e-Preis

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

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

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

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

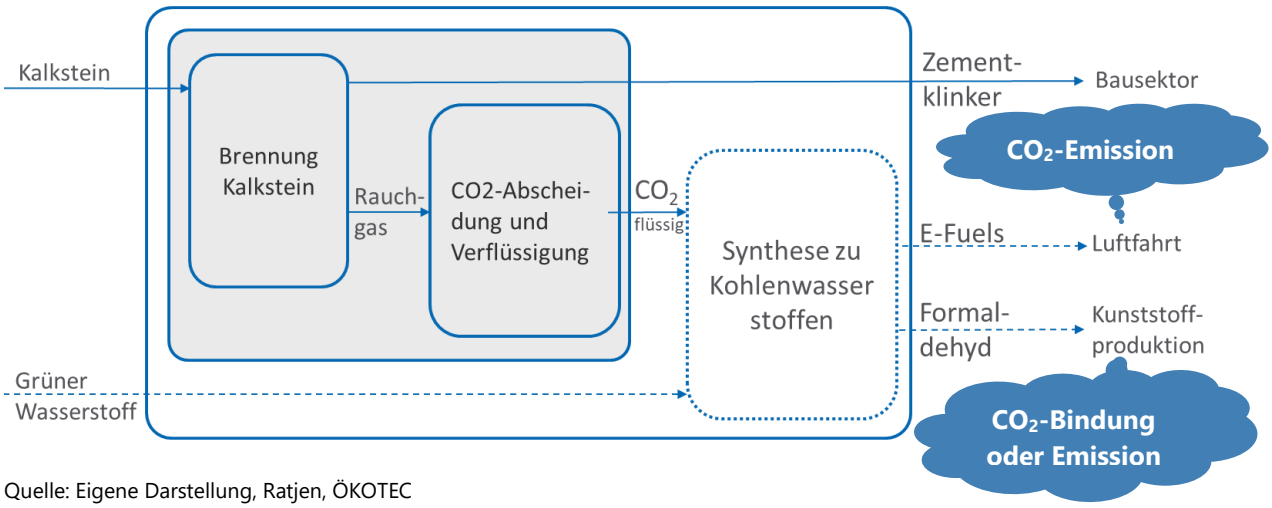
3.3 Beispiel: Vergleich der Product Carbon Footprints zwischen konventioneller und innovativer Zementproduktion

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 CO_2-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 CO_2-Abscheidung erfolgen. Ein Zementwerk möchte diesen Weg als Teil seiner Nachhaltigkeitsstrategie beschreiten und das abgeschiedene CO_2 einer Verwertung zuführen, die an anderer Stelle CO_2-Emissionen in Höhe der Emissionen vermeidet. Es liegt u. a. die Interessensbekundung eines Produzenten von E-Methanol vor, der das CO_2 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 5: Nutzen-Aufwand-Schema: Zementklinkerherstellung mit CO2-Verwertung



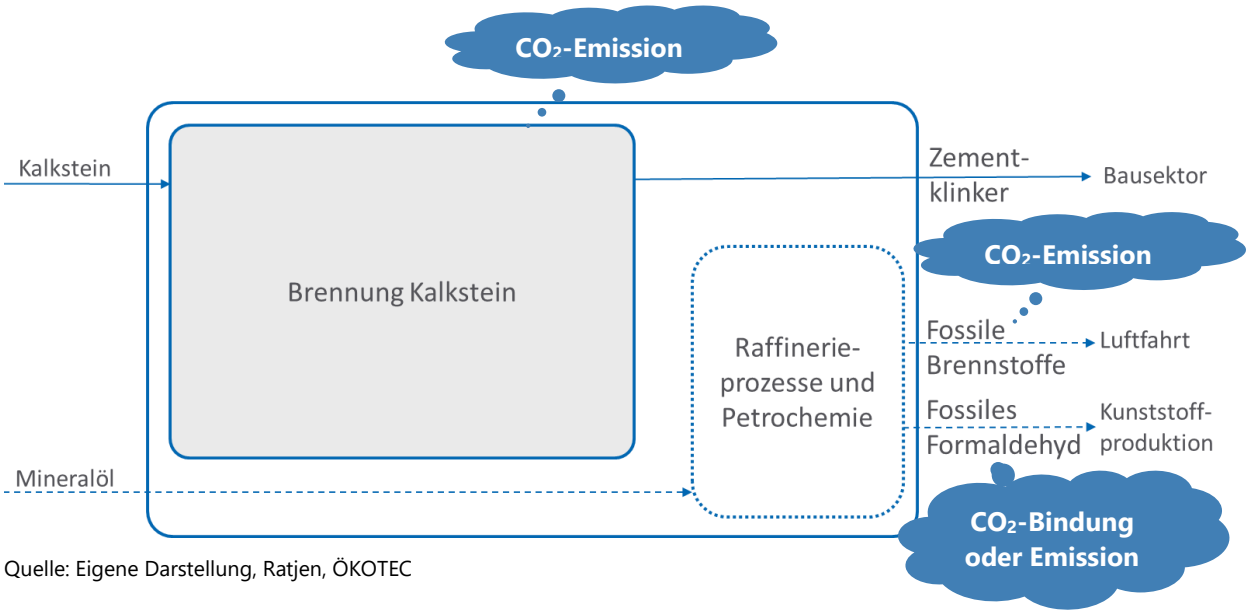
Quelle: Eigene Darstellung, Ratjen, ÖKOTEC

Im Soll-Zustand umfasst das Gesamtsystem die Zementproduktion und den betrachteten Verwertungspfad für das abgeschiedene CO_2. Die Nutzen des Gesamtsystems bestehen 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 CO_2-Emissionen treten bei der Abfallverbrennung auf – wenn das CO_2 nicht erneut abgeschieden und in einen neuen Verwertungszyklus überführt werden. Bei vollständigen Recyclingkreisläufen würde sich die Menge an Material, in dem CO_2 gebunden ist, stetig erhöhen, da stetig neues CO_2 hinzukommt.

Gesamt-System im Referenz-Zustand

Abbildung 6: Nutzen-Aufwand-Schema: Zementklinkerherstellung ohne CO2-Verwertung



Quelle: Eigene Darstellung, Ratjen, ÖKOTEC

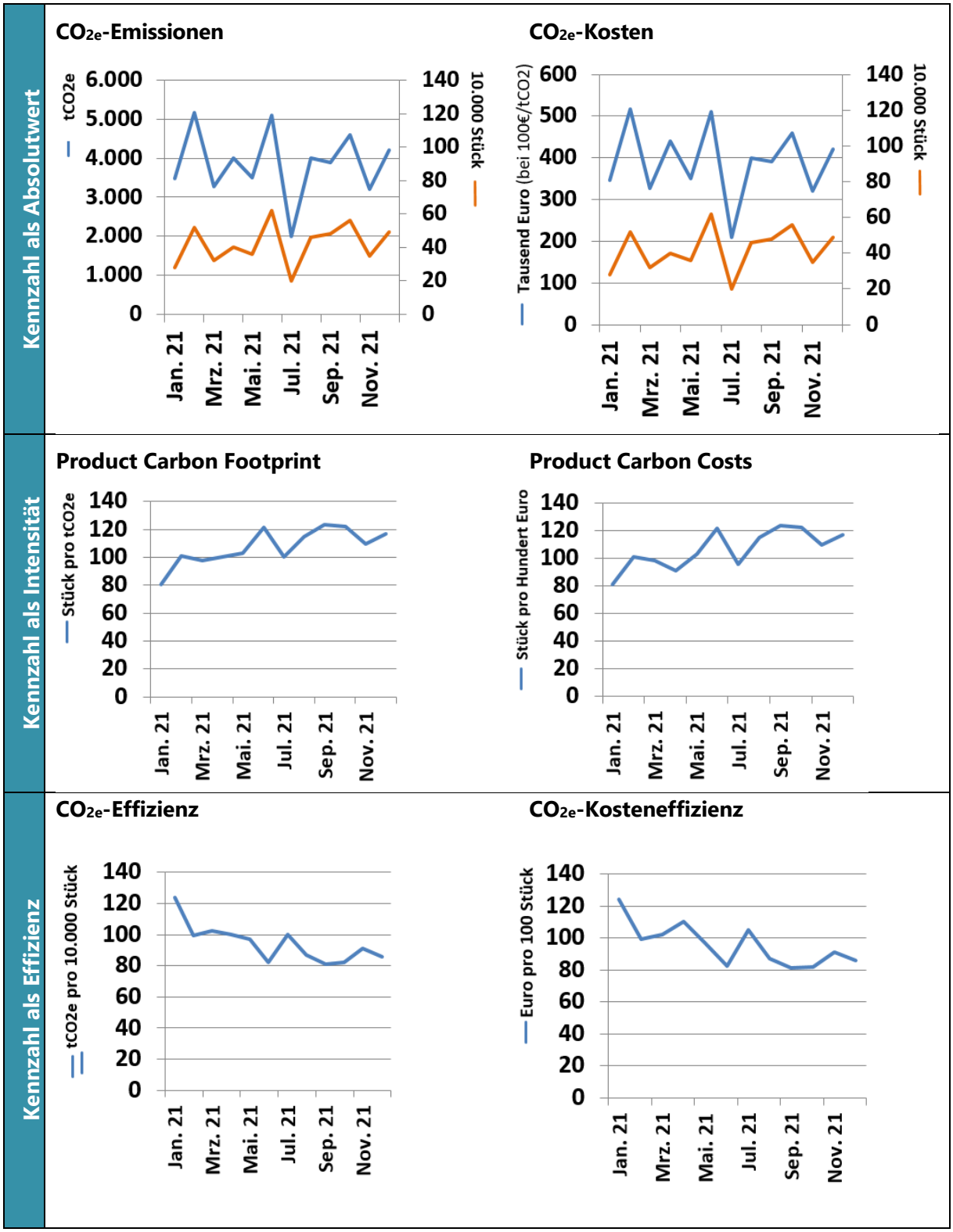
Um die Einspareffekte durch die innovative Produktion von Zementklinker bestimmen zu können, muss die Klimamanagerin ein Referenz-System definieren, das durch die Dekarbonisierungsmaßnahme substituiert wird. Die Systemgrenzen müssen so zugeschnitten sein, dass sich das System im Referenzzustand durch 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 CO_2-Emissionen in Höhe der abgeschiedenen Menge CO_2 führt. Das abgeschiedene CO_2 wird je nach Verwertung kurzfristig oder nach stofflicher Bindung emittiert, jedoch ersetzt es in derselben Menge CO_2 aus mineralölbasierten Produkten. Werden die Emissionen des abgeschiedenen CO_2 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 CO_2-Vermeidungswirkung die Verwertungspfade im Laufe der Zeit anpassen um sicherzustellen, dass nur Stoffe mit fossilem CO_2 substituiert werden. Wenn in einem Zukunftsszenario keine solchen Stoffe mehr vorhanden sind, bleibt dem Zementwerk CCS als Alternative.

3.4 Visualisierungsbeispiele der Kennzahlen in der „Erfassung“

Abbildung 7: Visualisierungsbeispiele einer Auswahl an Kennzahlen



Quelle: eigene Darstellung

4 Monitoring von PCFs und PCCs: Vergleich mit der Baseline

4.1 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.[6] 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.[7]

- 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 monitorenden Systems die **Vergleichsaufwände** des zu monitorenden Systems **($A_{Baseline}$)** in die dort genannten Formeln einsetzen.

Beispiele für Auswertungen

$$\textbf{Gütegrad [\%]} = \frac{\mathrm{CO_2\ Emissionen}_{Ist-Werte}}{\mathrm{CO_2\ Emissionen}_{Baseline}}$$

$$\textbf{Unterschied} = \mathrm{CO_2\ Emissionen}_{Ist-Werte} - \mathrm{CO_2\ Emissionen}_{Baseline}$$

$$\textbf{Unterschied [\%]} = \left(\frac{\mathrm{CO_2\ Emissionen}_{Ist-Werte}}{\mathrm{CO_2\ Emissionen}_{Baseline}} - 1\right) * 100$$

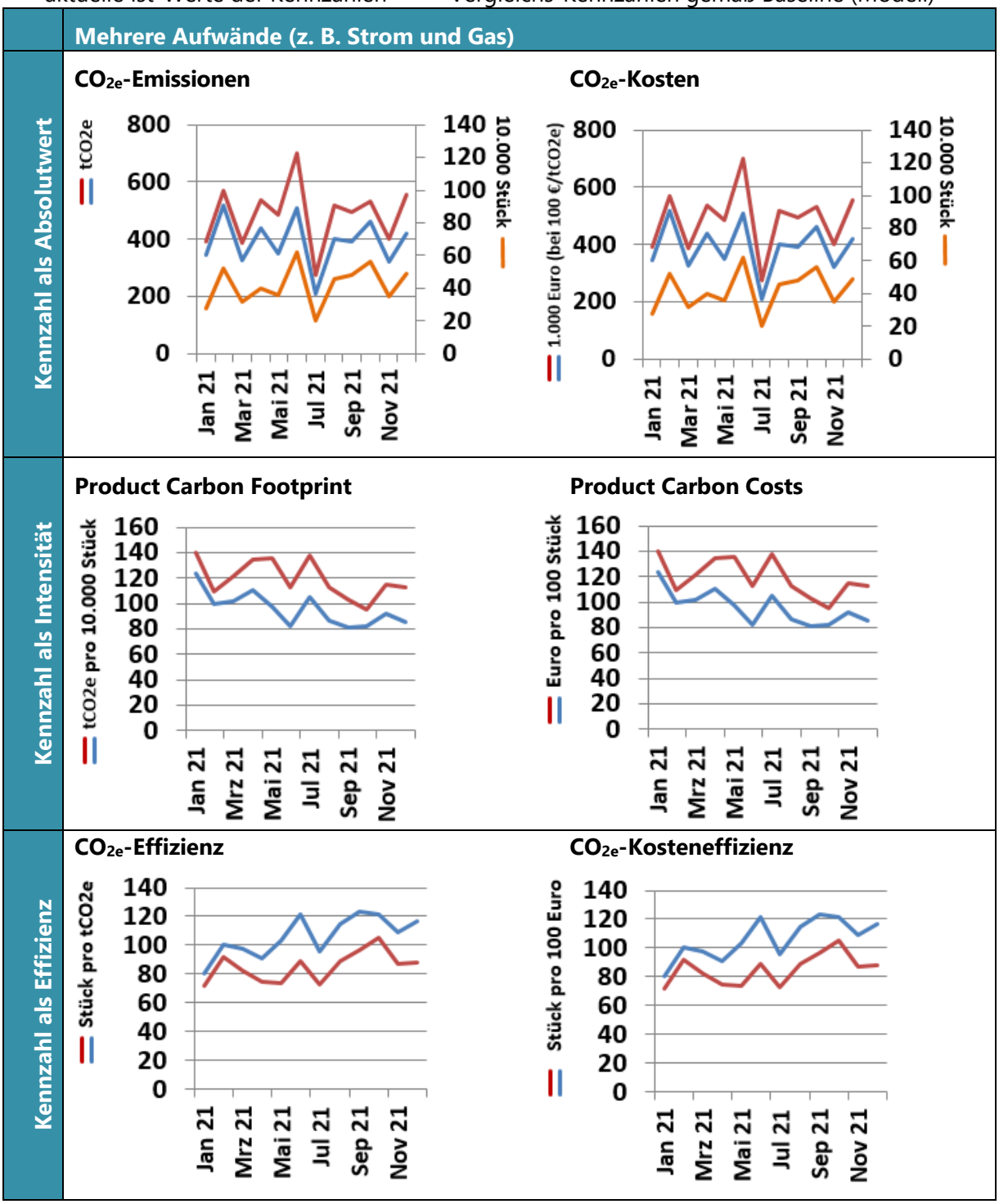
[6] Bei einer tiefgreifenden Dekarbonisierungsmaßnahme, die prozessbezogene CO2e-Emissionen umfassend reduziert, liefert ein Vergleich der Product Carbon Footprints vor und nach der Dekarbonisierungsmaßnahme eine i.d.R. ausreichende Evaluation zur Wirksamkeit. Im Anschluss ist für die dekarbonisierte Technik ein genaueres Monitoring nötig, um ihre Effizienz zu überwachen und fortlaufend zu verbessern.

[7] 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.

4.2 Visualisierungsbeispiele der Kennzahlen im „Monitoring“

Abbildung 8: Visualisierungsbeispiele im Monitoring

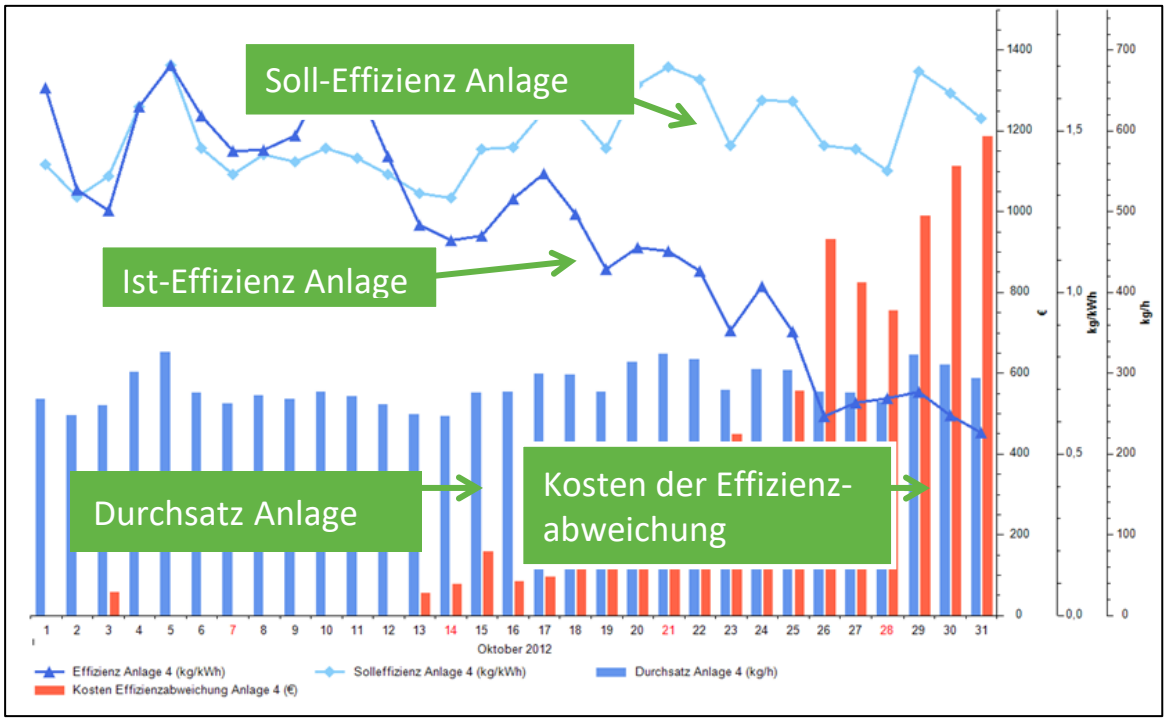
aktuelle Ist-Werte der Kennzahlen Vergleichs-Kennzahlen gemäß Baseline (Modell)



Quelle: eigene Darstellung

4.3 Beispiel für Monitoring: Effizienzüberwachung mit Frühwarnung

Abbildung 9: Kontinuierlicher Soll-Ist Vergleich im Monitoring



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 CO_{2e}-Emissionen nachweisen
- Anlagen vorausschauend und bedarfsabhängig Warten (Predictive Maintenance)
- Erfolge beim Klimaschutz verlässlich auswerten

5 Benchmarking von PCFs und PCCs: Vergleich mehrerer Systeme

5.1 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 CO_{2e}-Reduktion gegenüber einer verbreiteten Bestandstechnik darzustellen. Im ersteren Fall dient ein besonders effizientes System und im letzteren 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, den Nutzen und externe Einflussgrößen annehmen, muss 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 ($A_{Benchmark}$)**, die es 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 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 ($A_{Benchmark}$)** 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

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

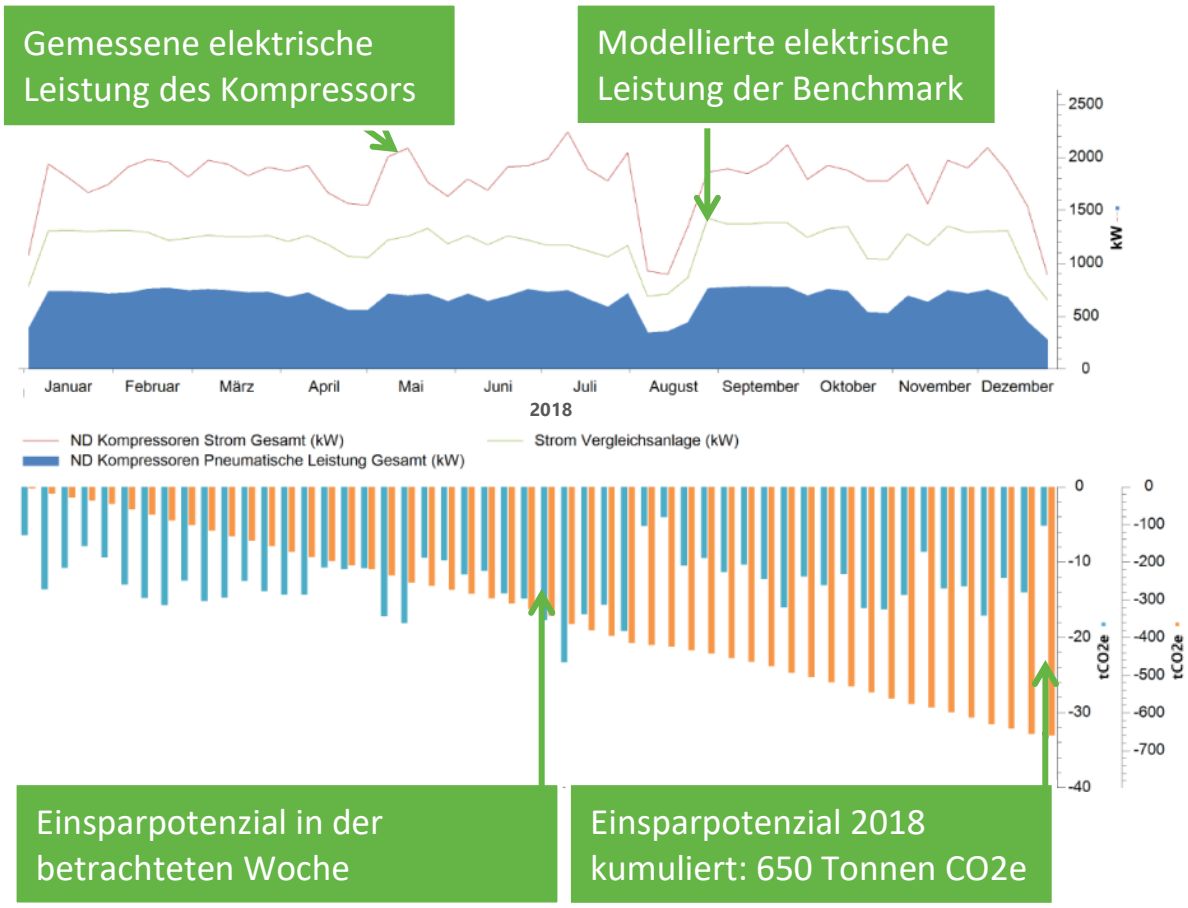
$$\text{Unterschied} = \text{CO}_2\ \text{Emissionen}_{Ist-Werte} - \text{CO}_2\ \text{Emissionen}_{Benchmark}$$

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

[8] 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.

5.2 Beispiel für Effizienz-Bewertung: Benchmarking von Kompressoren

Abbildung 10: Kontinuierlicher Vergleich im Benchmarking



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.

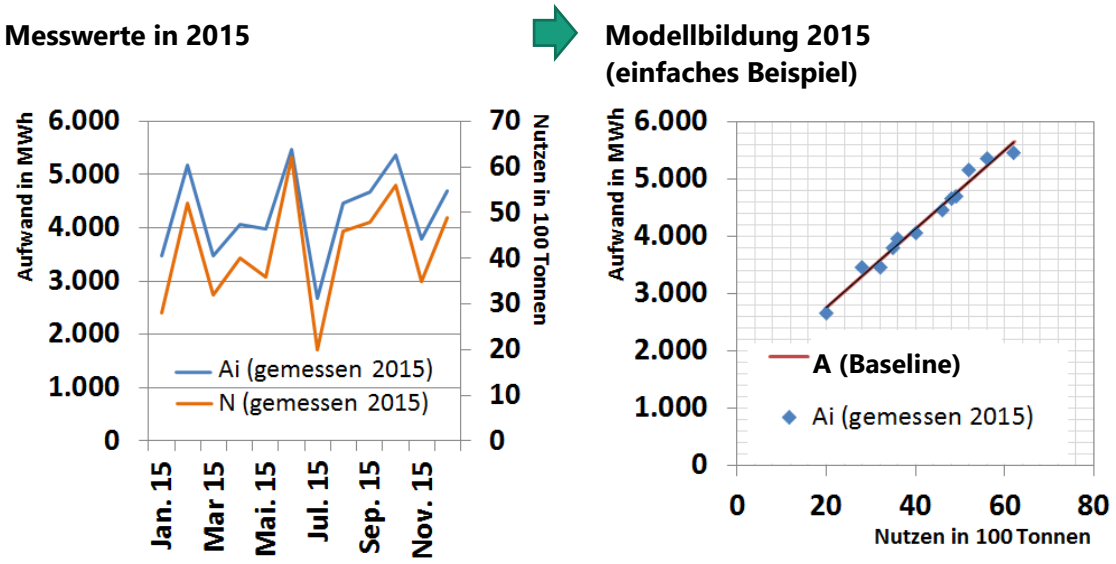
- Vermeidungspotenziale mittels Benchmarking mit anderen Anlagen quantifizieren
- CO_{2e}-Emissionen und –Kosten alternativer Produktion an eigenem Standort simulieren
- Die Effizienz der Produkterstellung im Vergleich mit Bestanlagen absolut einschätzen

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 eingesetzter 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 11: Modellbildung



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

A (Baseline) [MWh] = 69 [MWh/100 t]*Nutzen [100 t]+1390 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

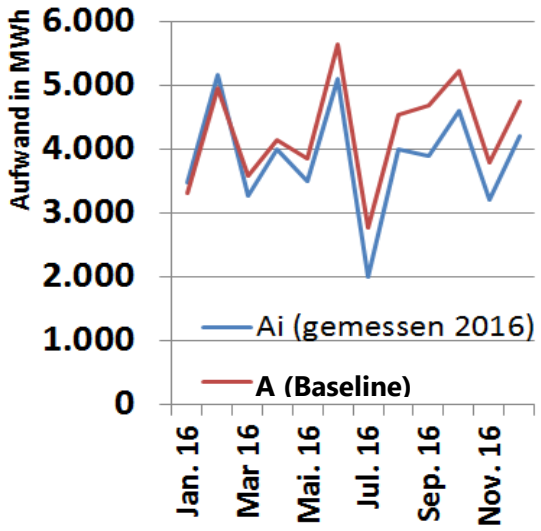
Um die Genauigkeit des statistischen Zusammenhangs überprüfen zu können, gibt die Software **statistische Prüfwerte** (MAPE, R^2, Signifikanz etc.) und graphische Prüfungen aus. Ist die Genauigkeit gering, kann das z. B. den Grund haben, dass wir relevante externe Einflussgrößen erst noch erfassen müssen 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 $\boldsymbol{A_{Baseline}}$, 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 $\boldsymbol{A_{BAseline}}$ werden anschließend jeweils in die Formeln zur Berechnung der Vergleichs-Kennzahlen eingesetzt, wie in Kapitel 4 und 3 aufgeführt.

Abbildung 12: Modellanwendung



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.

Annex II: Modellierung für das Benchmarking

Dieser Annex gibt Hintergrundinformationen, wie Effizienz-Controllingsoftware bzw. Statistiksoftware den Aufwand $\boldsymbol{A_{Benchmark}}$ 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 $\boldsymbol{A_{Benchmark}}$

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

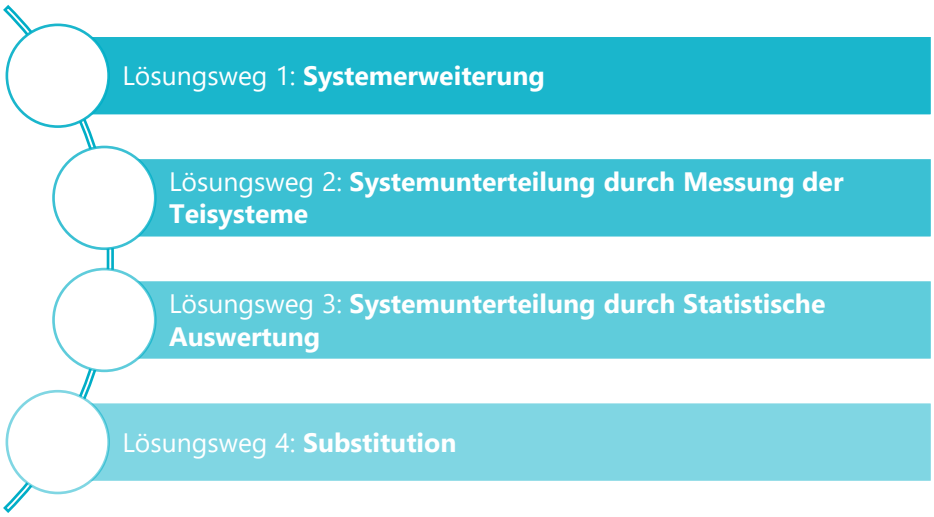
Alternativ: Nutzung eines bereits bekannten Benchmarks

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 $\boldsymbol{A_{Benchmark}}$ herangezogen werden.

Annex III: Umgang mit Systemen, die mehrere Nutzen produzieren

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

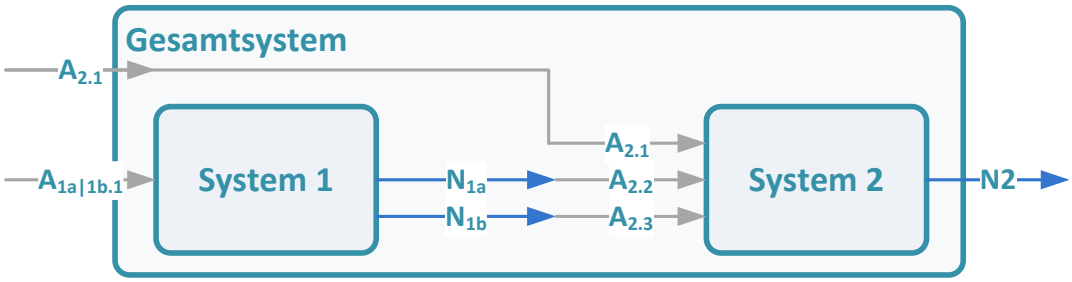
Abbildung 13: Allokation auf mehrere Nutzen



Quelle: eigene Abbildung

Lösungsweg 1: Umgehung des Problems durch Systemerweiterung

Abbildung 14: Lösung des Allokationsproblems durch Systemerweiterung[9]



Quelle: eigene Abbildung

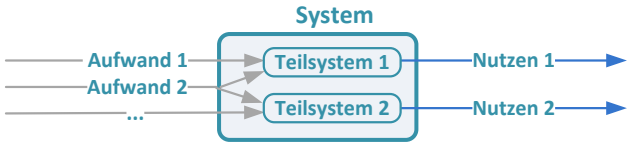
Am einfachsten kann das Problem gelöst werden, wenn es durch Systemerweiterung umgangen wird. Bei der Systemerweiterung wird ein Gesamtsystems mit einem Nutzen gebildet, so dass N_{1a} und N_{1b} nicht mehr betrachtet werden müssen. Nachteil dieser Methode ist dabei, dass Aussagen dann nur noch für das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

[9] 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 zur 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 15: Lösung des Allokationsproblems durch 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

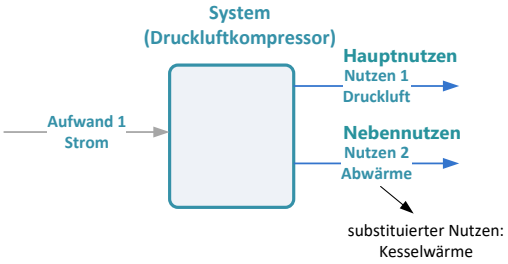
Mit Hilfe der statistischen Modellbildung kann der Aufwand 2 ebenfalls getrennt ermittelt werden. Diese Methode ist dem Lösungsweg 2 in der Genauigkeit unterlegen. Auch bei statistischer Ermittlung der Verteilung des Aufwands 2 lassen sich Bewertungsfaktoren wie gehabt berechnen.

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. Die Verfahren lassen sich auch untereinander kombinieren.

Abbildung 16: Lösung des Allokationsproblems bei Systemen mit gekoppelten Nutzen[10]

System mit Haupt- und Nebennutzen

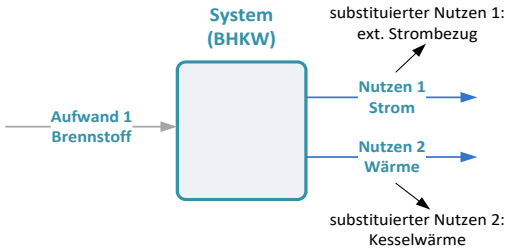


$$\mathbf{pN_1} = \frac{\mathbf{AB} - \mathbf{pN_{Sub2}} * \mathbf{N_2}}{\mathbf{N_1}}$$

Erweiterung für mehr als 2 Nutzen:

$$\mathbf{pN_1} = \frac{\mathbf{AB} - (\mathbf{pN_{Sub2}} * \mathbf{N_2} + \cdots + \mathbf{N_{Subn}} * \mathbf{N_n})}{\mathbf{N_1}}$$

System mit gleichrangigen Nutzen



$$\mathbf{pN_1} = \frac{\mathbf{AB}}{\mathbf{N_1} + \frac{\mathbf{pN_{Sub2}}}{\mathbf{pN_{Sub1}}} * \mathbf{N_2}}$$

Anm.: Konsistenz zur **Finnischen Methode**

Erweiterung für mehr als 2 Nutzen:

$$\mathbf{pN_1} = \frac{\boldsymbol{AB}}{\mathbf{pN_{Sub1}} * \boldsymbol{N_1} + \cdots + \mathbf{pN_{Subn}} * \boldsymbol{N_n}} * \mathbf{pN_{Sub1}}$$

Quelle: eigene Abbildung

[10] 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: $pN_{Sub1.adjustiert} = pN_{sub1} * N_{Sub1}/N_1$

Annex IV: Kalkulatorische Kosten für CO_{2e}: 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.

- 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 in 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

- Schritt1: 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 emissionshandelspflichtig. 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.