



Fallstudie zur ökologischen Bewertung des CO₂-Fußabdrucks für die Herstellung und den Betrieb von Thermoprosesstechnik

Carsten Gondorf, Christian Schwotzer, Herbert Pfeifer

Aachener Ofenbau- und Thermoprosess-Kolloquium

Aachen, 18.10.2023

Agenda

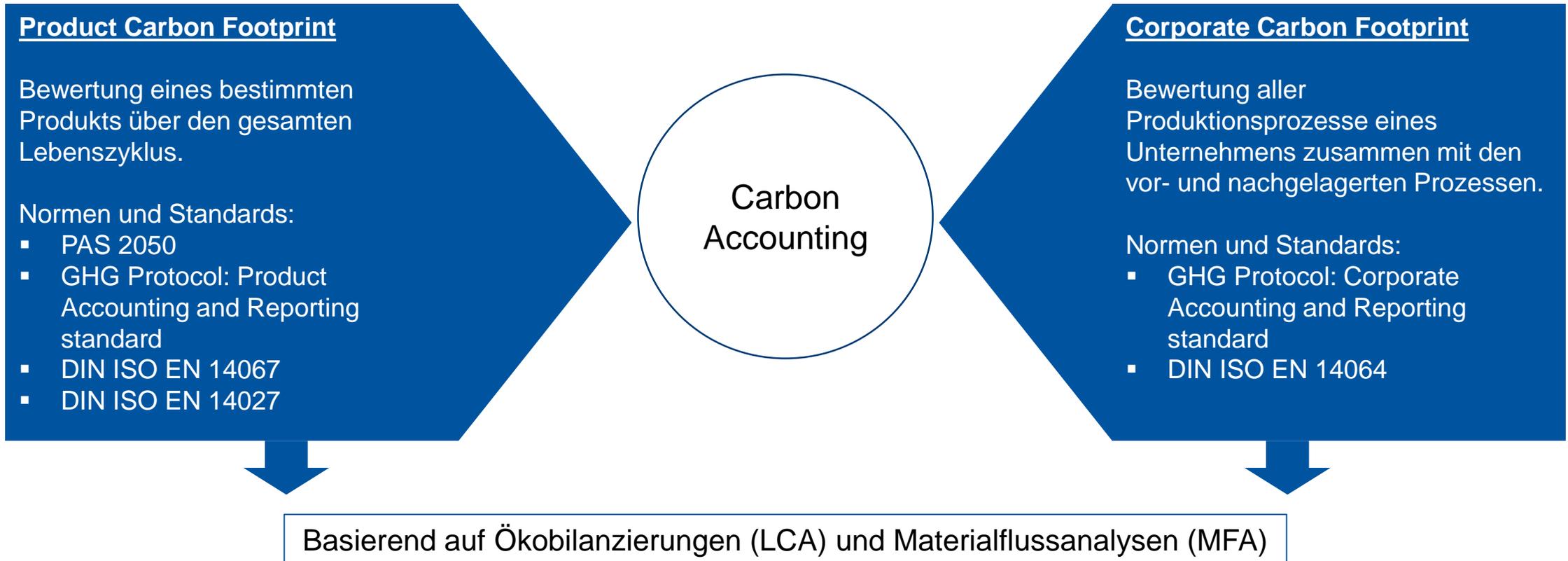
- Motivation
- Vorgehen
- Stand der Technik
- Methodik
- Fallstudie PCF Berechnung von Thermoprozesstechnik
- Zusammenfassung
- Ausblick

Energiewende und Klimaziele sorgen für neue Herausforderungen

- Fossile Energieträger stehend zunehmend unter Druck
- **Regularien und Rahmenbedingungen** (national/international) verändern sich
- Vielfach besteht ein Konflikt zwischen Emissionsminderung und Wirtschaftlichkeit
- Technisches Potential der Thermoprozesstechnik bereits hoch
- Mehrdimensionale, **standortspezifische Herausforderung** für die TPT

Dimension	2021	2030	2040	2050
Technisches Potential	Welche CO ₂ -neutrale Technik ist realisierbar und zu welchen Zeitpunkt? Besteht FuE Bedarf?			
Energetisches Potential	Wie hoch ist der spezifische Energiebedarf und kann dieser weiter reduziert werden?			
Ökologisches Potential	Wann ist eine neue Technik ökologisch sinnvoll? Entwicklungen am Energiemarkt entscheidend.			
Ökonomisches Potential	Wann ist eine CO ₂ -neutrale Technik wirtschaftlich und unter welchen Rahmenbedingungen?			

Carbon Accounting – Product Carbon Footprint und Corporate Carbon Footprint



Anwendung einer spezifischen Methodik und Systematik für die Erstellung des CO₂-Fußabdrucks von Thermoprozessanlagen unter Berücksichtigung von Standortfaktoren anhand eines Technikbeispiels.

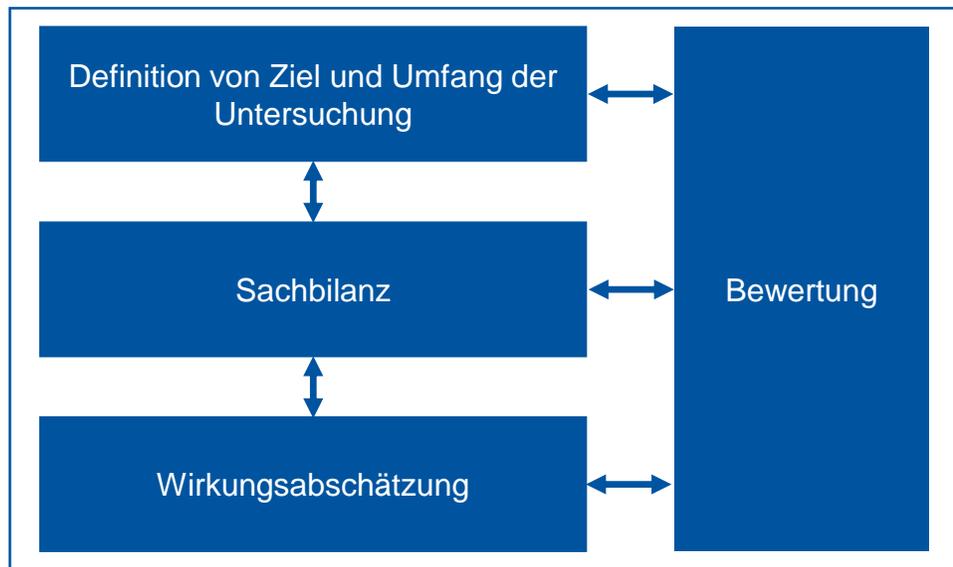
Scope der Untersuchung:

- Fokus auf Scope 1 & 2 Treibhausgasemissionen der Nutzungsphase
- Eigenständige Ausweisung vor- und nachgelagerten Aktivitäten (Scope 3) der Herstellungsphase
- Einfluss von Standortfaktoren auf CO₂-Emissionen während der Anlagenutzung
- Einfluss von dynamischen Faktoren

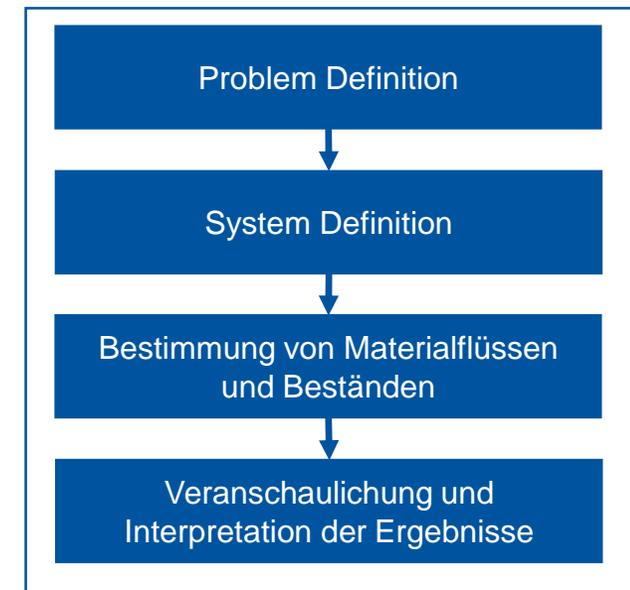
Grundlagen der Ökobilanz (LCA) und Materialflussanalyse (MFA)

- LCA: Zusammenstellung und Bewertung der Input- und Outputströme sowie der potenziellen Umweltauswirkungen eines Produktsystems während seines Lebenszyklus
- MFA: Systematische Bewertung des Zustands und der Veränderungen von Stoffströmen und -beständen innerhalb eines räumlich und zeitlich definierten Systems

Phasen der Ökobilanzierung [1]



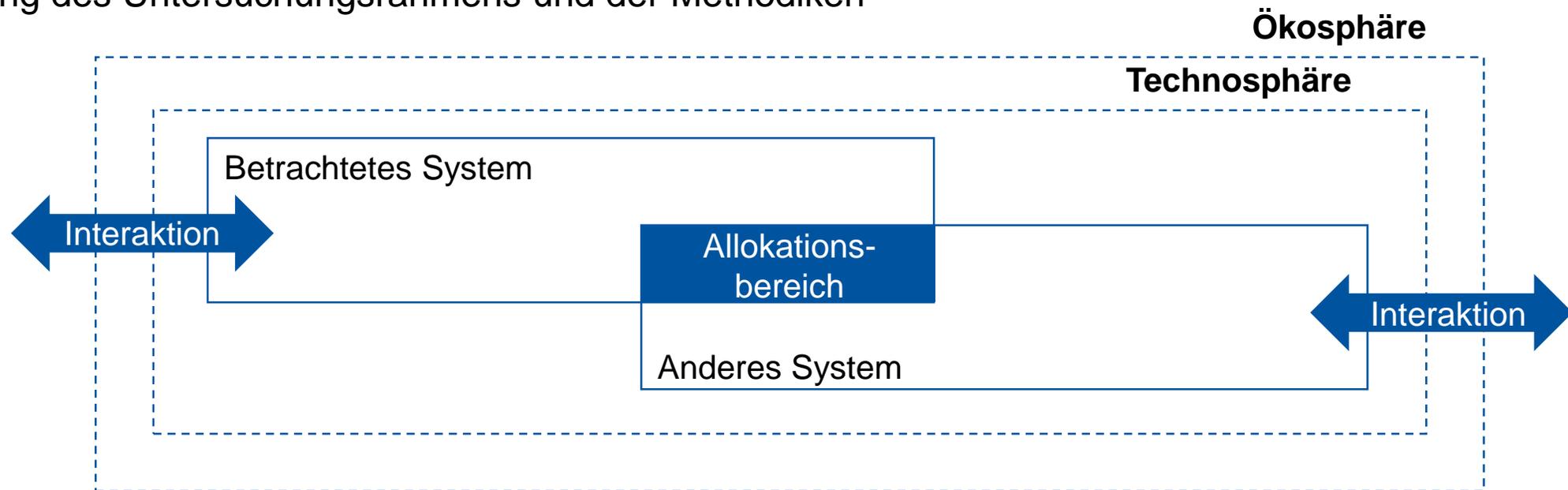
Phasen der Materialflussanalyse [2]



Quelle: [1] DIN EN ISO 14040, DIN EN ISO 14044, [2] Brunner et al. 2004

Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

- Zieldefinition
- Definition des Produktsystems, Funktioneller Einheit und Referenzfluss
- Festlegung des Untersuchungsrahmens und der Methodiken



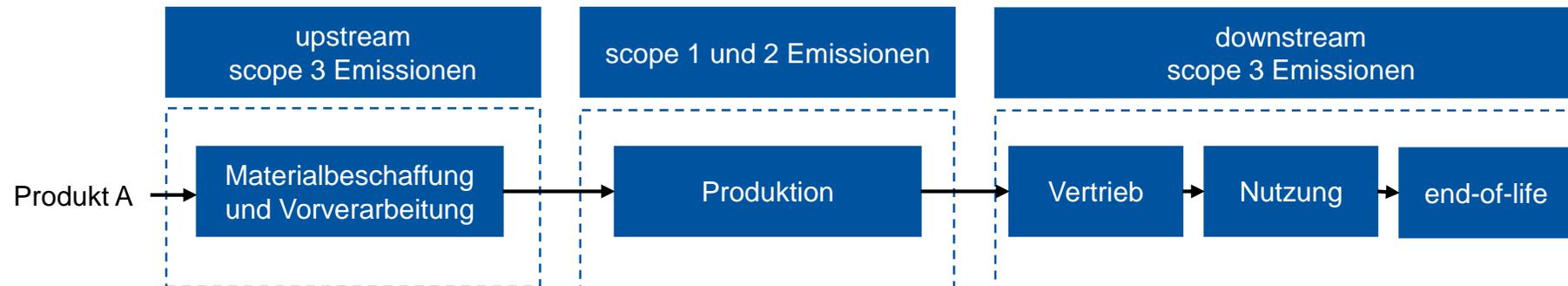
Quelle: DIN EN ISO 14040, Klöpffer (2017); Sundmacher (2002)

Methodik zur Erstellung des PCF – Phase 1

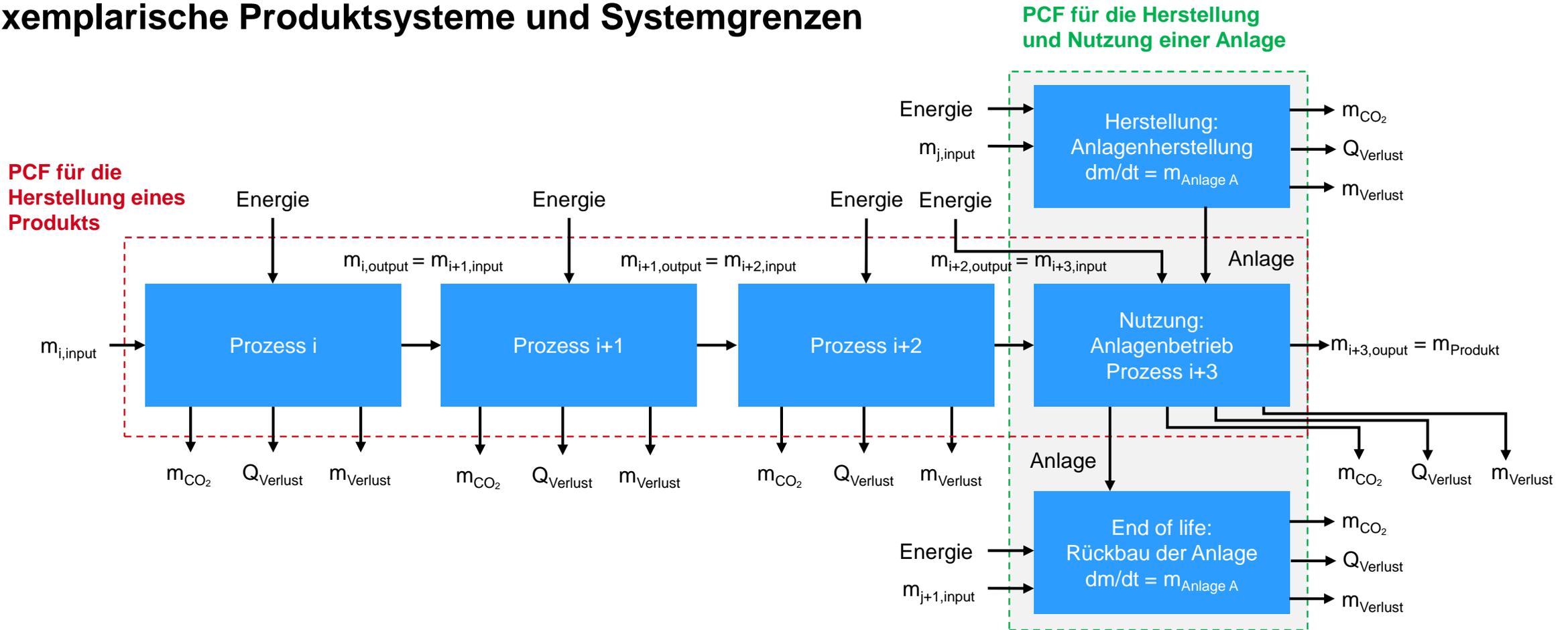
Quelle: Greenhouse Gas Protocol (2013)

Beschreibung der Scopes

Grad der Komplexität des Untersuchungsrahmens	Beschreibung
Scope 1 (Direkte THG-Emissionen)	Direkt freigesetzte THG-Emissionen, die unmittelbar dem Produktsystem zuzuordnen sind (z. B. Abgase aus dem Verbrennungsprozess)
Scope 2 (Indirekte THG-Emissionen)	Indirekte THG-Emissionen, die dem Produktsystem zuzuschreiben sind (z. B. die Emissionen des Strommixes, der zur Bereitstellung der für das Produkt benötigten elektrischen Energie verwendet wird)
Scope 3 (Andere THG-Emissionen)	Andere THG-Emissionen, die den vor- und nachgelagerten Lebensphasen des Produktsystems zugeordnet werden können (z. B. Rohstoffgewinnung, Recycling)

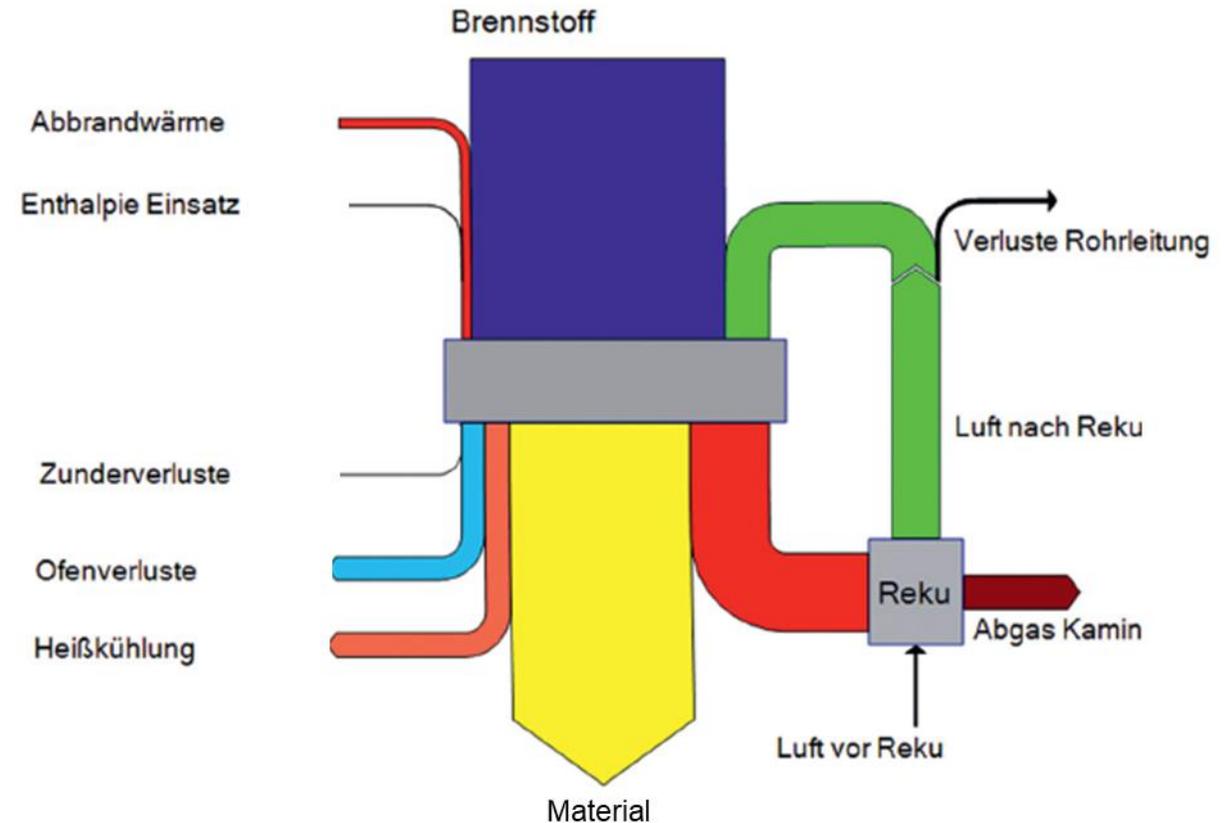


Exemplarische Produktsysteme und Systemgrenzen



Sachbilanz und Bestimmung von Materialflüssen und Beständen

- Datenerhebung
 - Berechnung der Daten
 - Zuordnung zu Prozessmodulen
 - Modellierung des Produktsystems
- Wesentlicher Bestandteil: Massen- und Energiebilanzen



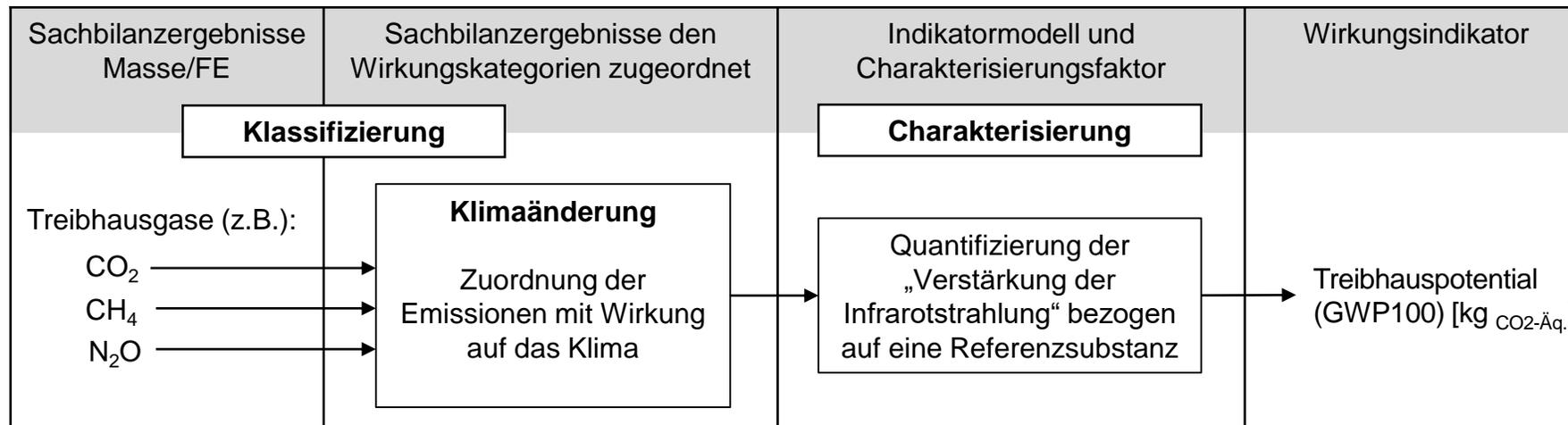
Quelle: Pfeifer et al. (2018)

Methodik zur Erstellung des PCF – Phase 3

Wirkungsabschätzung

- Auswahl der Wirkungskategorien
 - Hier: Klimaänderung
- Zuordnung der Sachbilanzergebnisse (Klassifizierung)
- Berechnung der Wirkungsindikatorwerte (Charakterisierung)
 - Hier: Treibhauspotenzial für die nächsten 100 Jahre (GWP100) in $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{-Äquivalente}}$

Werden bei einer Aktivität gleichzeitig 1 kg CO_2 ($\text{GWP}_{100} = 1$) und 1 kg Methan ($\text{GWP}_{100} = 28$) emittiert, so betragen die Gesamtemissionen in Form des $\text{GWP}_{100} = 29 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-Äquivalente}}$.

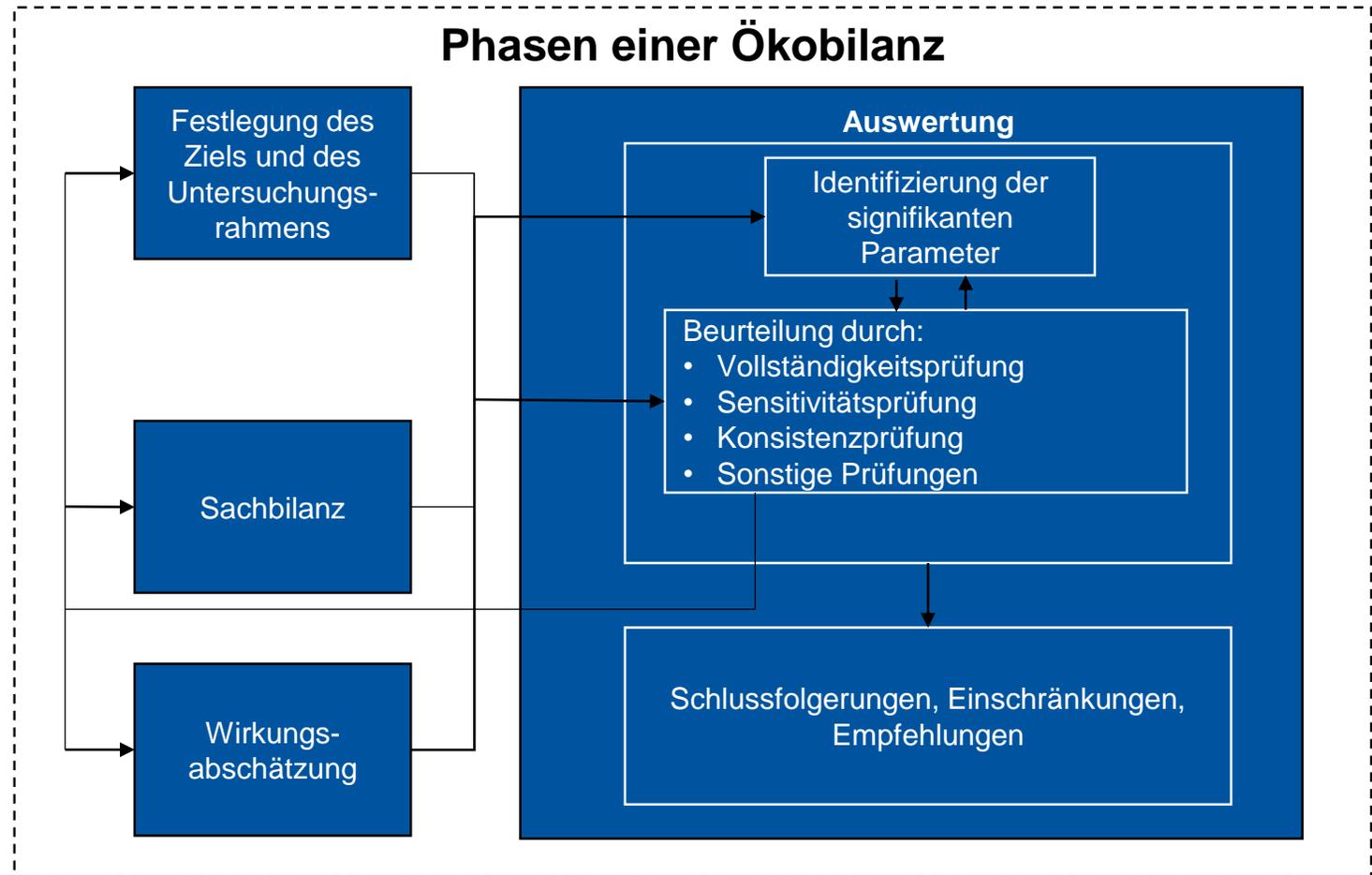


Quelle: Klöpffer (2017)

Methodik zur Erstellung des PCF – Phase 4

Auswertung

- Identifizierung der signifikanten Parameter
- Beurteilung der Methode
 - Sensitivitätsprüfung
 - Konsistenzprüfung
 - Vollständigkeitsprüfung
- Schlussfolgerungen und Zusammenfassung

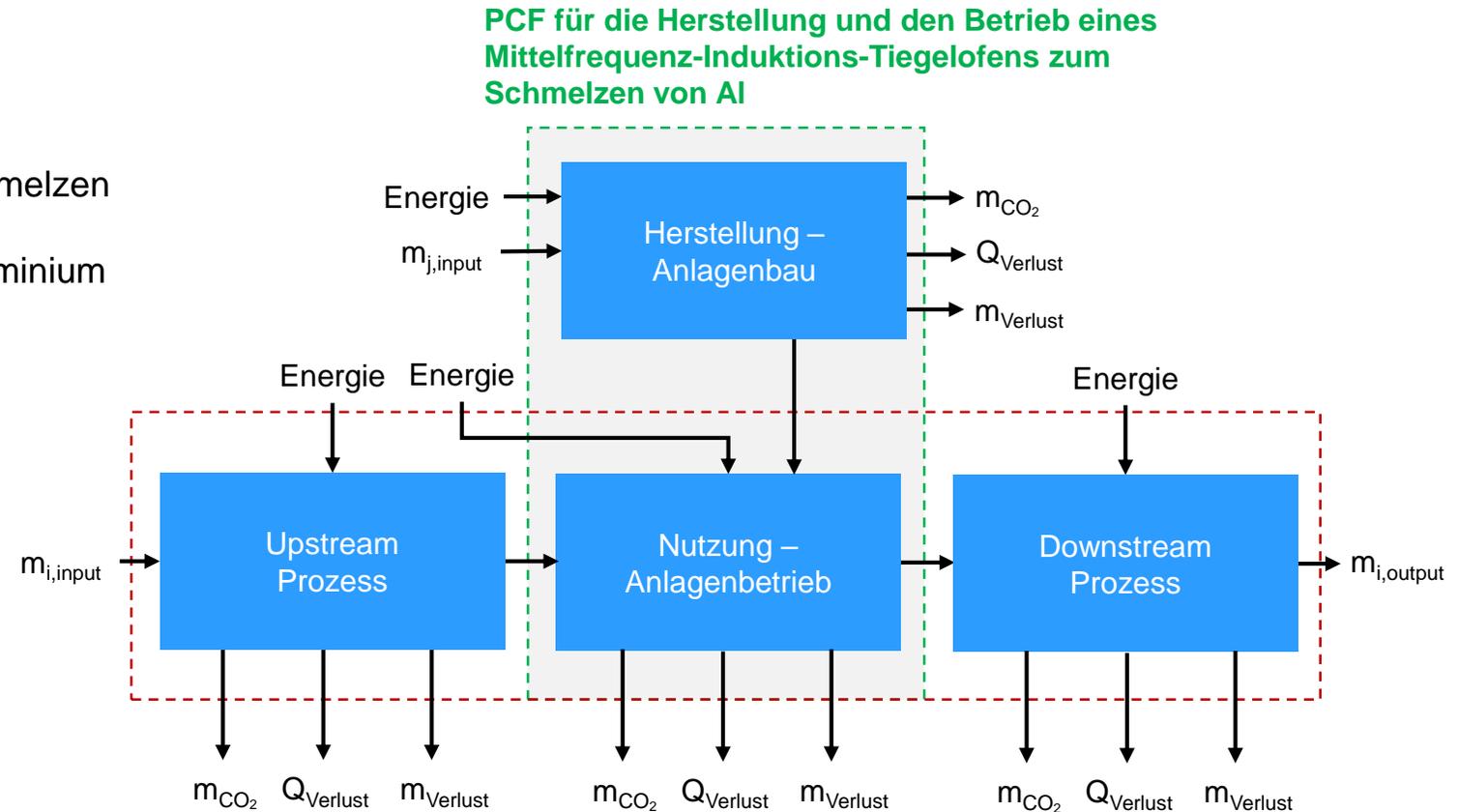


Quelle: DIN EN ISO 14040

Fallstudie PCF Berechnung von Thermoprozesstechnik

Definition der Systemgrenzen

- PCF-Berechnung für die Herstellungsphase (Anlagenbau) und die Nutzungsphase (Anlagenbetrieb)
 - Mittelfrequenz-Induktions-Tiegelofens zum Schmelzen von Aluminium
 - Funktionelle Einheit = 1 t geschmolzenes Aluminium
 - Referenzfluss von 30 Jahren Standzeit



Fallstudie PCF Berechnung von Thermoprozesstechnik

Herstellung der MFT-Anlage – Materialanalyse

Materialart	Werkstoffarten	MFT-Anlage	
		Gewicht	Anteil
Kunststoffe	Epoxidharz, Melamin, Polyamide (PA), Polycarbonate (PC), Polyethylen (PE), Polyethylenterephthalat (PET), Polypropylen (PP), Polyurethan (PU), Polyvinylchlorid (PVC), Synthetikgummi, Silikone, Polytetrafluorethylen (PTFE), Sonstiges (z.B. Klebstoffe, Farben)	5 t	2,5 %
Materialverbund	Faserverbundstoffe, Gefügte Metalle, Kunststoff-Metall-Verbund, Keramik-Metall-Verbund	5 t	2,5 %
Metalle	Aluminiumlegierungen, Kupferlegierungen, Edelstahllegierungen, Gusslegierungen, Nickelbasislegierungen, Normal-Stähle, Zinklegierungen, Sonstiges (z.B. Lot, Schweißelektroden)	165 t	82,5 %
Nichtmetallische Werkstoffe	Beton, Feuerfestmaterial, Holz, Kohlenwasserstoff-Gemische, Mineralwolle, Sonstiges (z.B. Flachs, Hanf)	25 t	12,5 %
Betrachtetes Gesamtgewicht		200 t	100 %

Fallstudie PCF Berechnung von Thermoprozesstechnik

Nutzung der MFT-Anlage – Betriebsparameter

Betriebsparameter		MFT-Anlage
Durchschnittliche Angaben	Elektrischer Energieverbrauch	641 kWh/t _{Gut}
	Durchsatz	4,2 t _{Gut} /h
Produktionsmenge über gesamte Standzeit		900.000 t_{Gut}

Grundannahme

- 3 Schichtbetrieb
- 7.200 h im Jahr (300 Arbeitstage)
- 30 Jahre Standzeit
- Anwendung des Materialpool-Ansatzes für die Nutzungsphase
 - Umweltauswirkungen des behandelten Materials im Durchschnitt
 - Ohne Berücksichtigung von Spezifikationen (z. B. Legierungszusammensetzung), vor- und nachgelagerten Verarbeitungsschritten und prozessbezogenen Produkten
- Keine Anwendung von Allokationen für die Nutzungsphase

Nutzung der MFT-Anlage – Emissionsfaktor des deutschen Strommix

Jahr	Ø CO ₂ -Emissionsfaktorentwicklung des deutschen Strommix in kg _{CO2} /kWh		
	Negative Entwicklung	Ausgangsszenario	Positive Entwicklung
2020	0,375	0,375	0,375
2030	0,330	0,230	0,135
2040	0,182	0,154	0,127
2050	0,033	0,017	0,009

- Dynamische Entwicklung der Emissionsfaktoren des allgemeinen Strommix in Deutschland nach [1-4]

Quelle: [1] UBA (2021), [2] UBA (2022), [3] UBA (2021), [4] BMWK (2021)

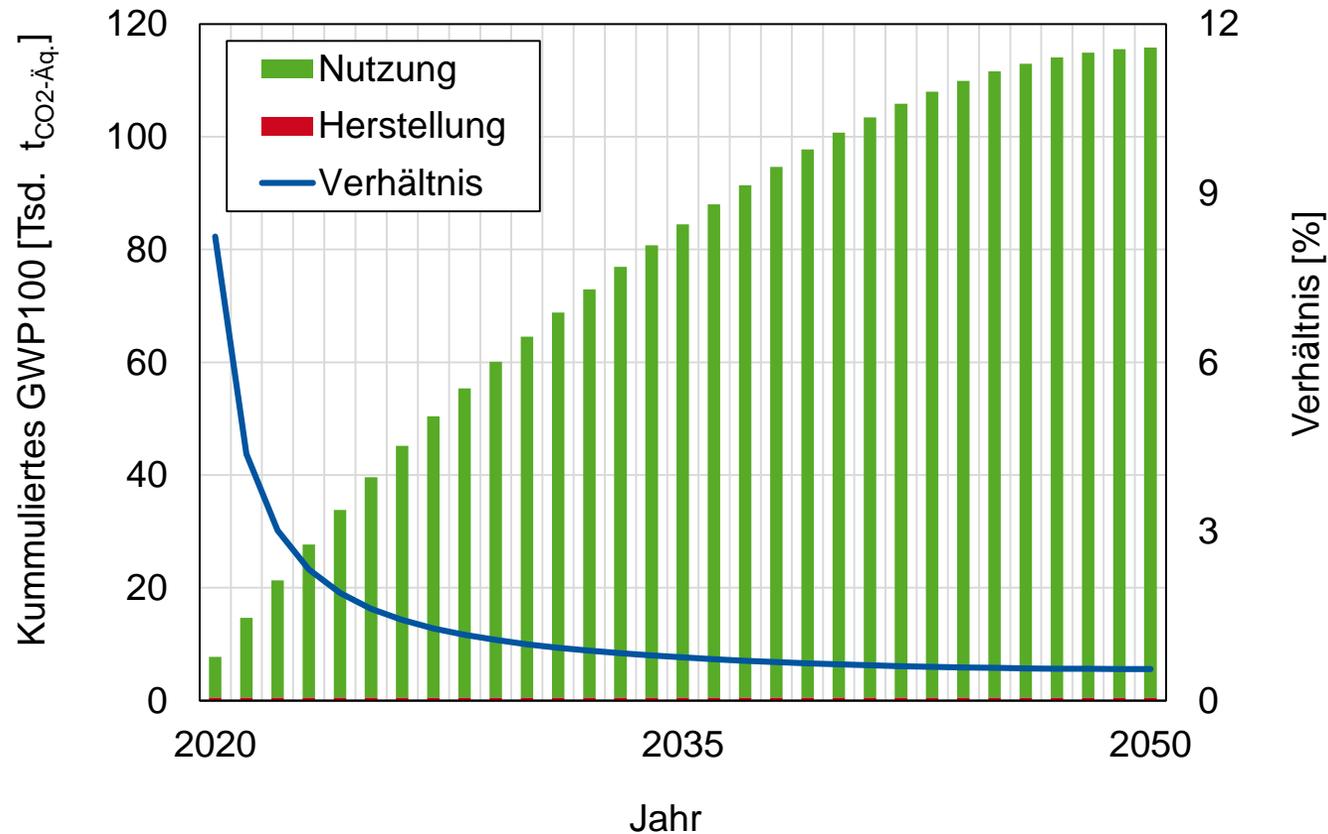
Fallstudie PCF Berechnung von Thermoprozesstechnik

Ergebnis - Herstellungsphase

Ergebnis der Sachbilanz		Ergebnis der Wirkungsabschätzung	
Medium	Angabe	EF	GWP100
Elektrizität (Scope 2)	14,63 MWh	0,38 t _{CO2-Äq.} /MWh	5,45 t _{CO2-Äq.}
Erdgas (Scope 1)	163,82 MWh	0,20 t _{CO2-Äq.} /MWh	32,76 t _{CO2-Äq.}
Kunststoffe (Scope 3)	5,51 t	3,25 t _{CO2-Äq.} /t	17,92 t _{CO2-Äq.}
Materialverbund (Scope 3)	5,91 t	4,29 t _{CO2-Äq.} /t	25,34 t _{CO2-Äq.}
Metalle (Scope 3)	164,28 t	3,35 t _{CO2-Äq.} /t	549,53 t _{CO2-Äq.}
Nicht-metallische Werkstoffe (Scope 3)	25,15 t	0,62 t _{CO2-Äq.} /t	15,71 t _{CO2-Äq.}
Gesamt			647,75 t _{CO2-Äq.}

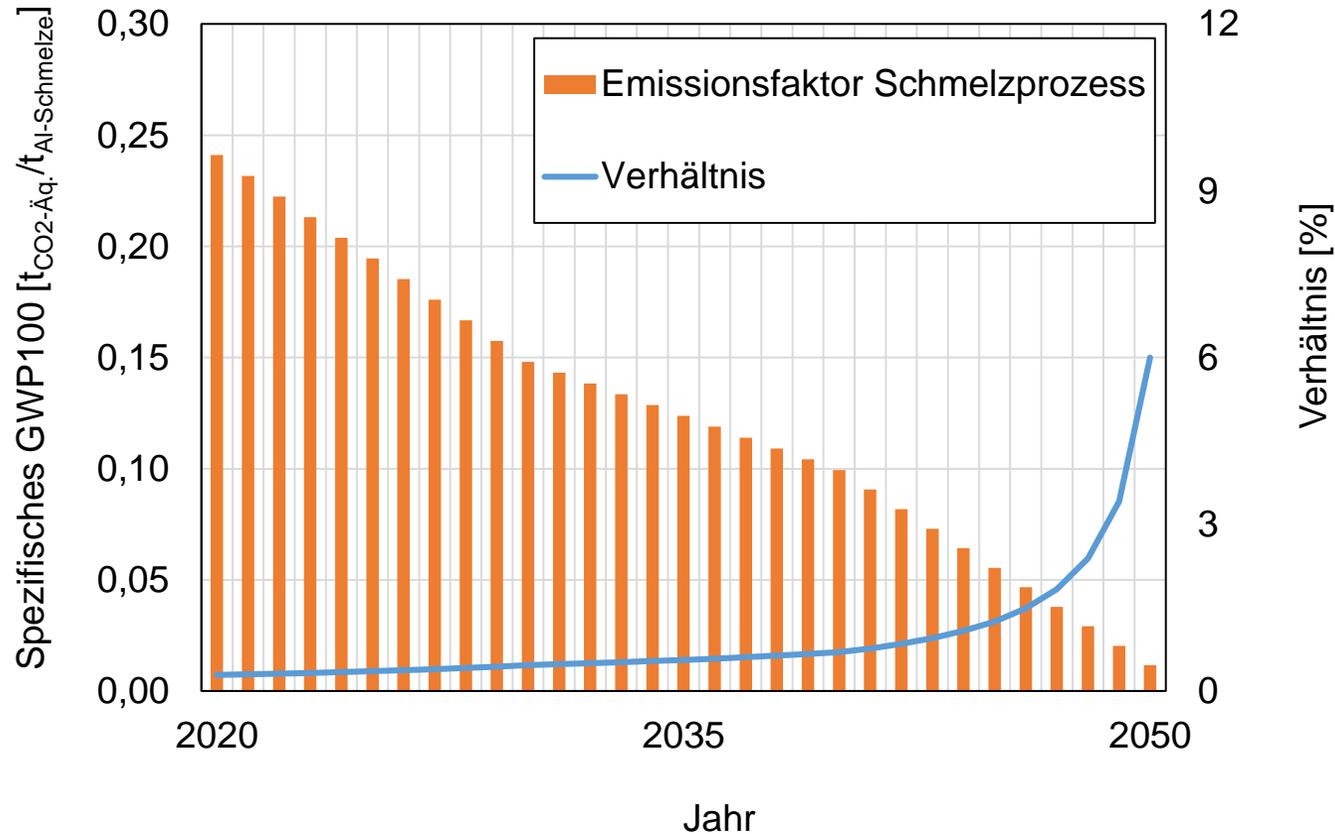
- Größter Anteil durch indirekte Scope 3 Emissionen (ca. 94 %)

Kumulierte Entwicklung des GWP100



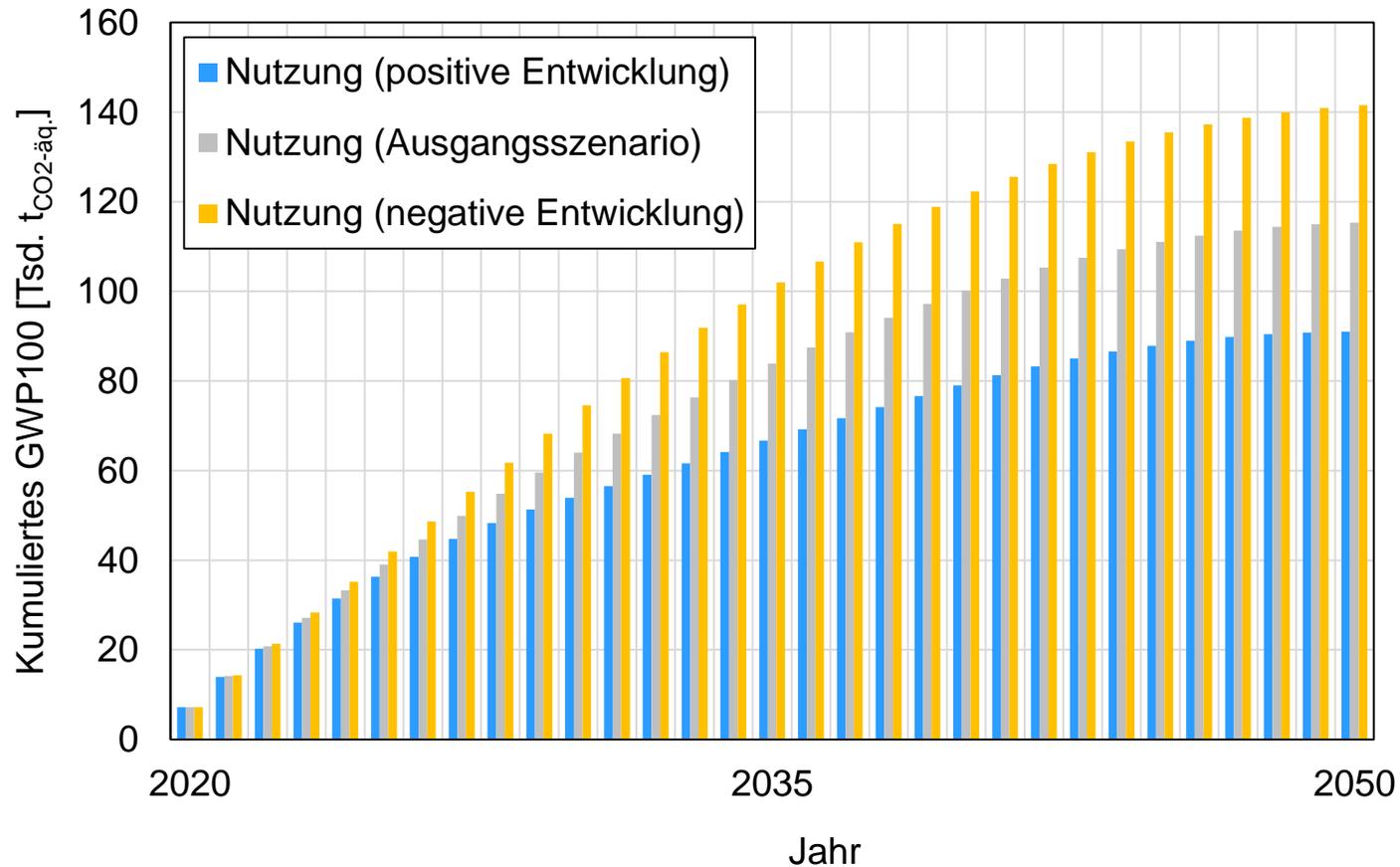
- **Herstellungsphase**
 - 648 t_{CO2}-Äq.
- **Nutzungsphase**
 - 115.303 t_{CO2}-Äq.
- **Verhältnis Herstellung zur Nutzung**
 - 8,23 % (2020)
 - 0,56 % (2050)

Spezifische Entwicklung des GWP100



- Emissionsfaktor Schmelzprozess
 - 0,24 t_{CO2}-Äq./t_{Al}-Schmelze (2020)
 - 0,01 t_{CO2}-Äq./t_{Al}-Schmelze (2050)
- Verhältnis Herstellung zur Nutzung
 - 0,29 % (2020)
 - 6,00 % (2050)

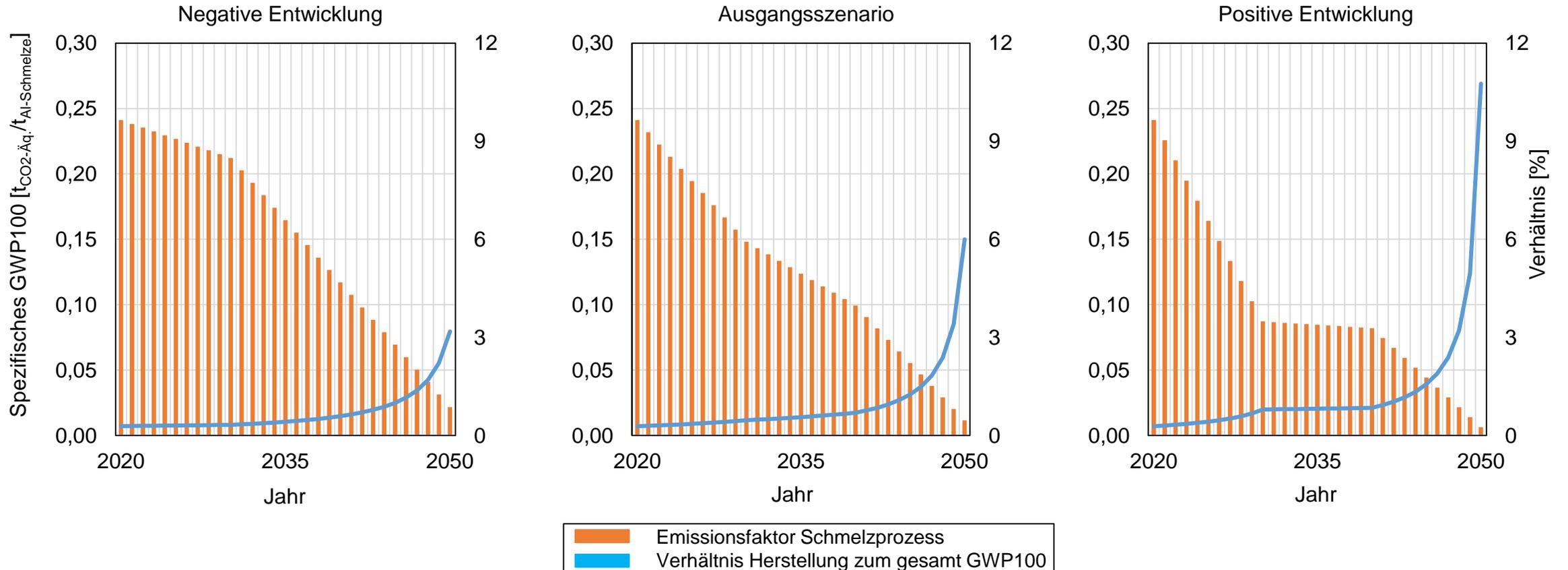
Einfluss des deutschen Strommix auf die kumulierte Entwicklung des GWP100



- Positive Entwicklung des d. Strommix
 - 90.996 t_{CO2-äq.} (-21,1 %)
- Ausgangsszenario
 - 115.303 t_{CO2-äq.}
- Negative Entwicklung des d. Strommix
 - 141.514 t_{CO2-äq.} (+22,7 %)

Fallstudie PCF Berechnung von Thermoprozesstechnik

Einfluss des deutschen Strommix auf die spezifische Entwicklung des GWP100



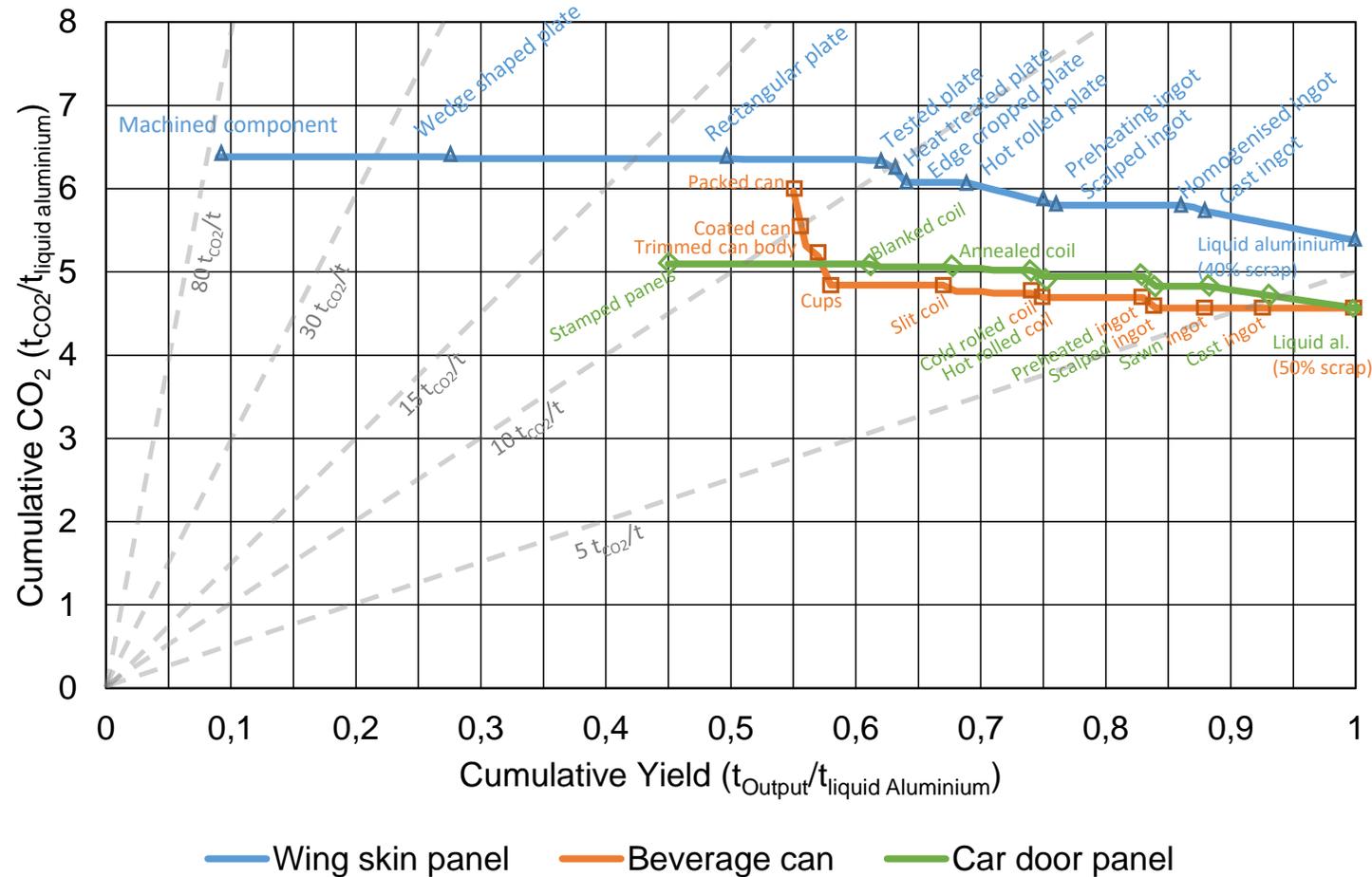
Zusammenfassung

- Die Produktion der Anlage hat einen geringen Anteil am CO₂-Fußabdruck, der jedoch in den nächsten Jahrzehnten an Bedeutung gewinnen wird
- Signifikanter Einfluss auf die Ergebnisse der Ökobilanz
 - Geografische Faktoren
 - Dynamische Faktoren
- Größte Einschränkungen der Ökobilanz
 - Transparenz der Lieferanten
 - Einfluss der verwendeten Datenbanken
 - Teilweise Vereinfachung
- Umfassende Massen- und Energiebilanz der Prozesse sind elementare Grundlage

Ausblick

- Erweiterung der PCF Berechnung auf die gesamte Prozesskette

Cumulative CO₂-emissions over cumulative yield for different aluminium products



Source: Milwood et al. 2011

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Kontakt und Ansprechpartner:

RWTH Aachen University
Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik
Kopernikusstraße 10
52074 Aachen
www.iob.rwth-aachen.de

Carsten Gondorf, M.Sc.
Tel.: +49 241 80 26074
gondorf@iob.rwth-aachen.de