

LEBENSZYKLUSANALYSE (LCA) EINES TANK THERMAL ENERGY STORAGES (TTES)

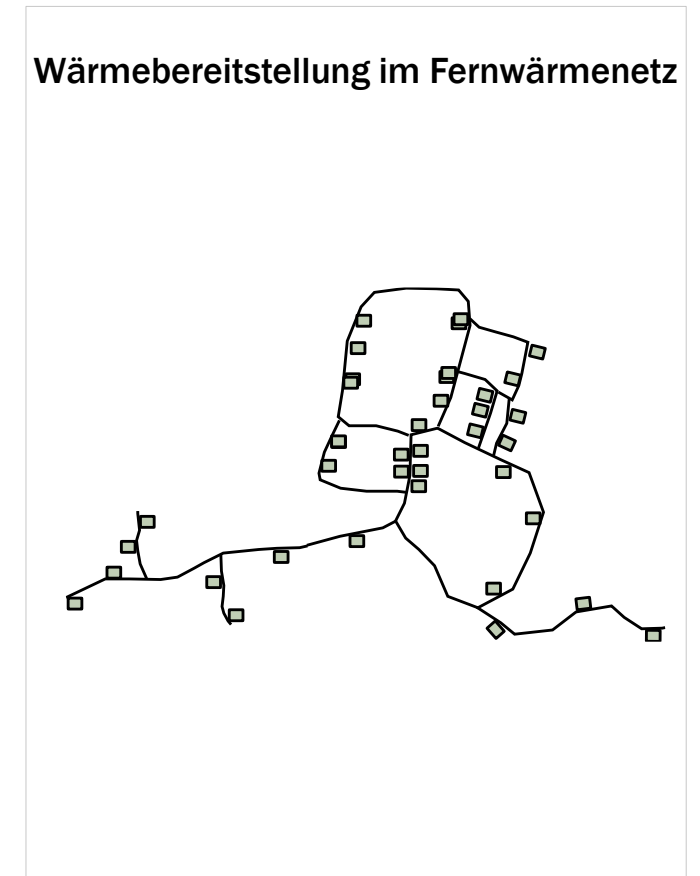
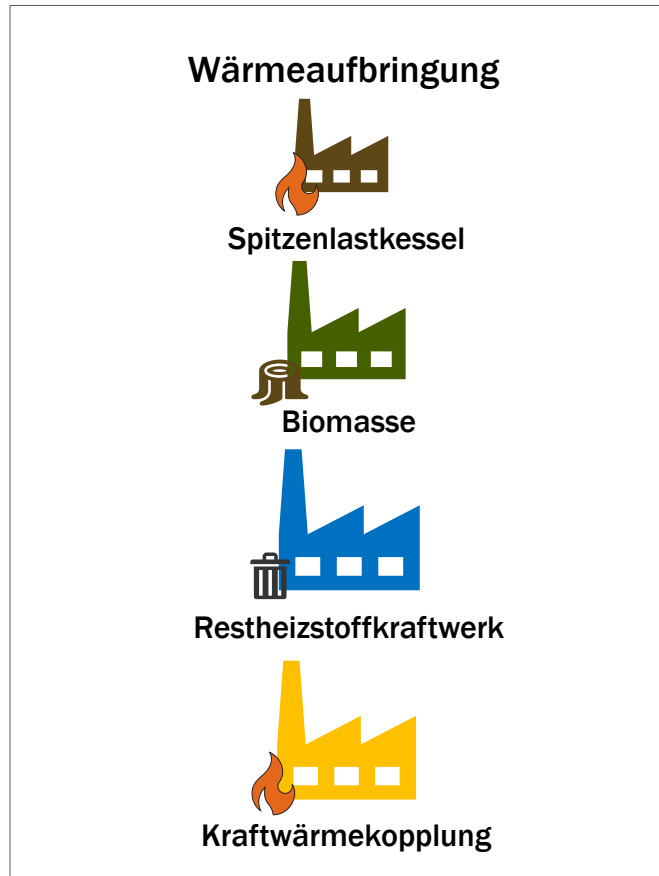
EnInnov 2026
19. Symposium Energieinnovation
TU Graz

11.-13.02.2026

Helene Mihatsch
Junior Researcher
Energieinstitut an der Johannes Kepler
Universität Linz

Einleitung

Motivation eine Lebenszyklusanalyse für einen Stahltank-Fernwärmespeicher durchzuführen



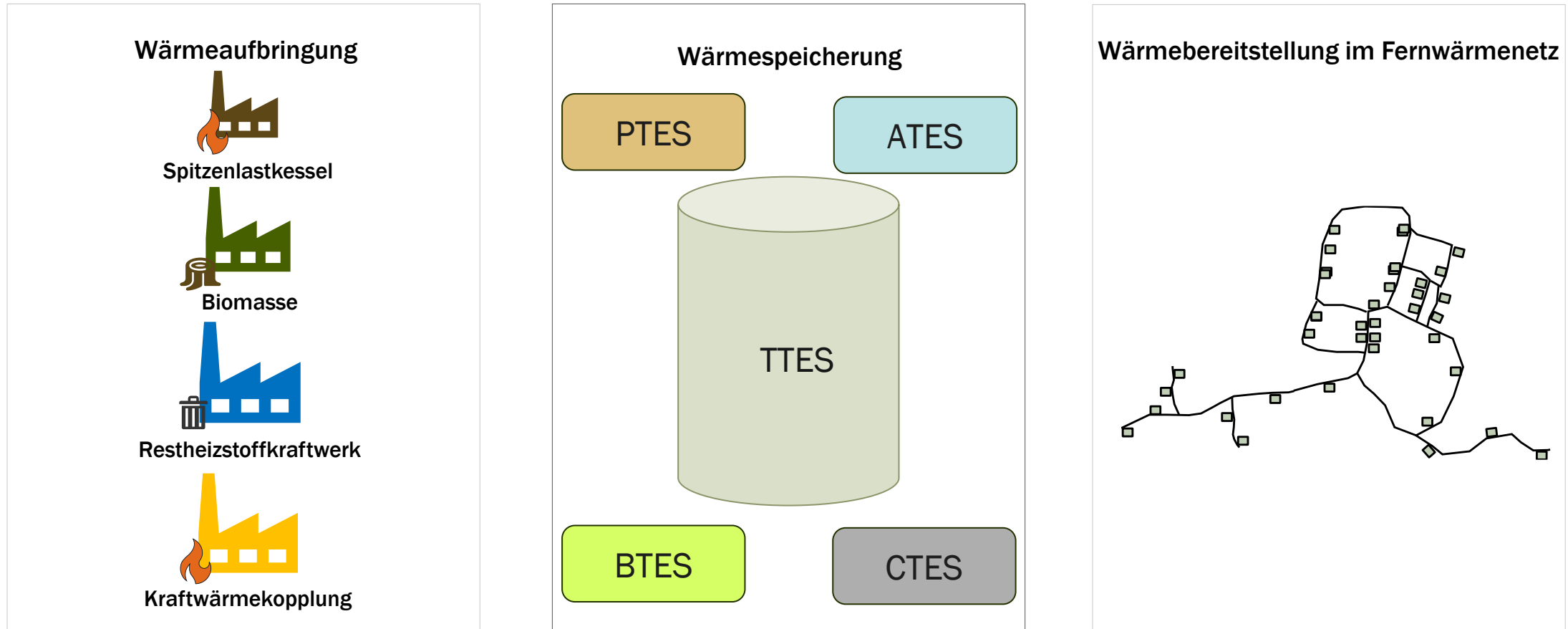
Einleitung

Motivation eine Lebenszyklusanalyse für einen Stahltank-Fernwärmespeicher durchzuführen



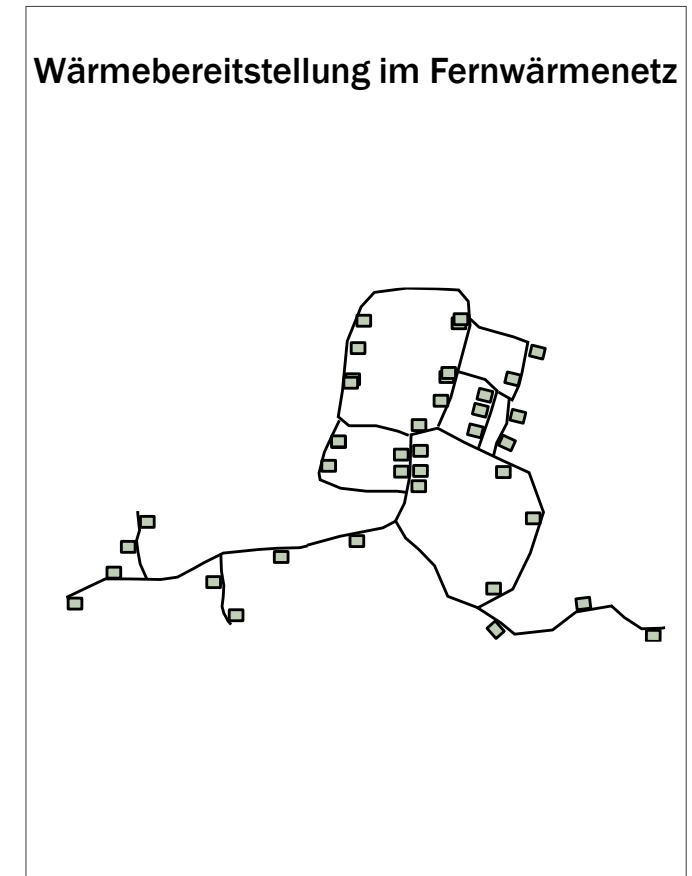
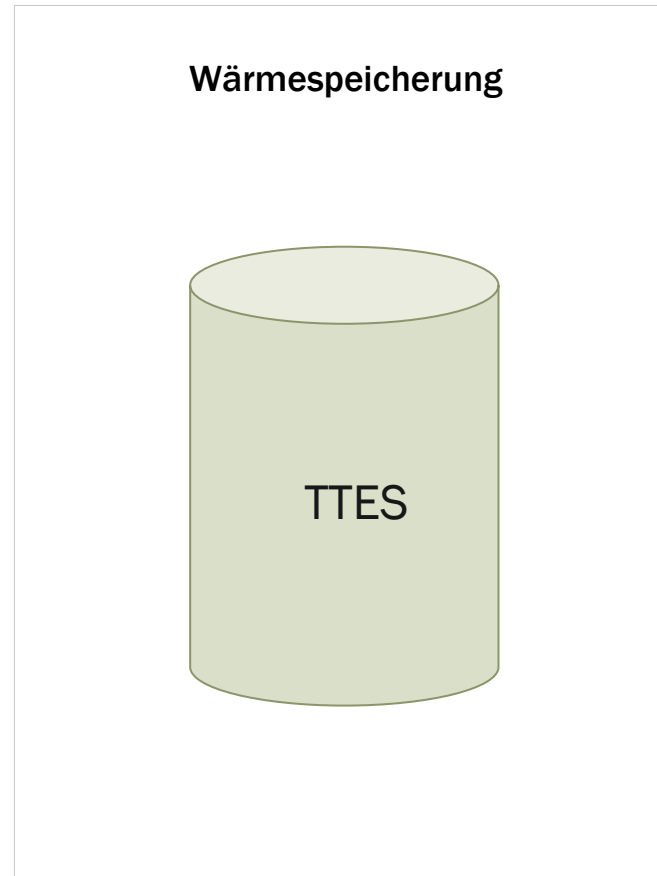
Einleitung

Motivation eine Lebenszyklusanalyse für einen Stahltank-Fernwärmespeicher durchzuführen



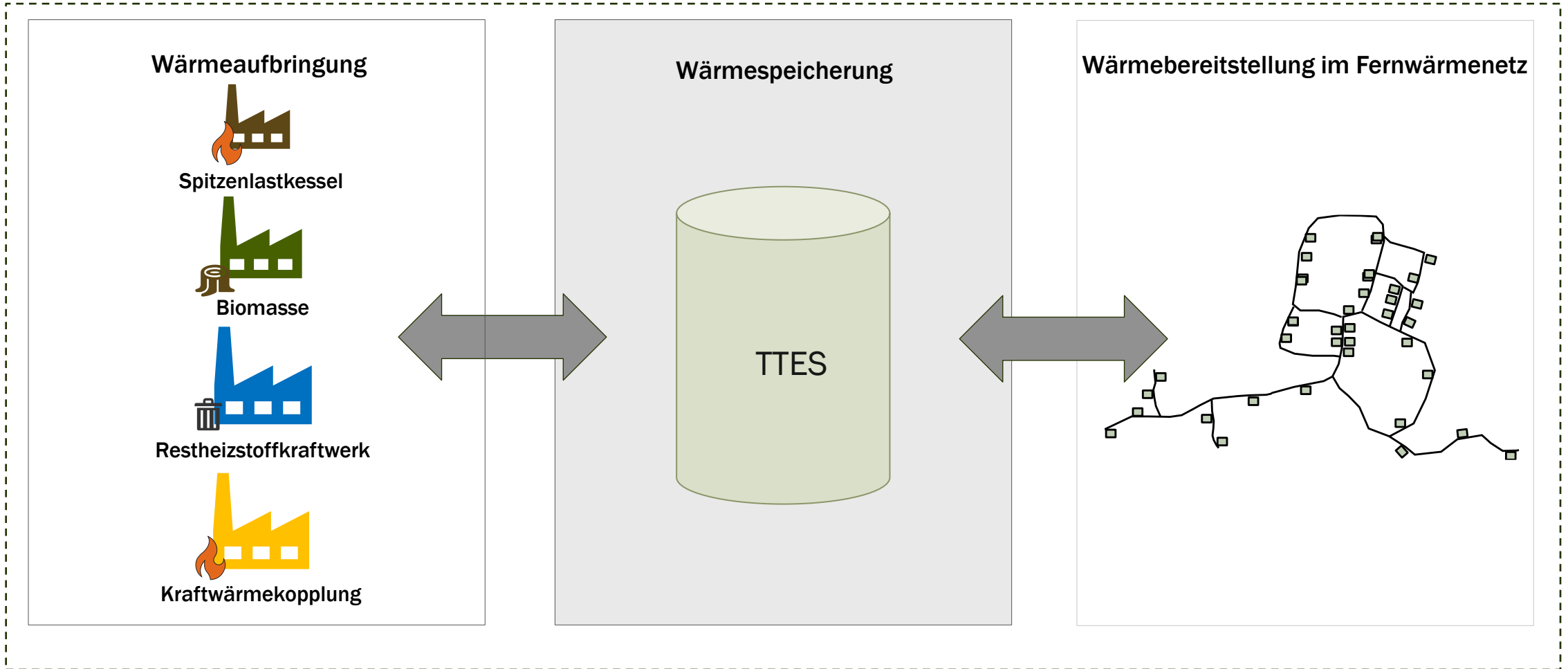
Einleitung

Motivation eine Lebenszyklusanalyse für einen Stahltank-Fernwärmespeicher durchzuführen



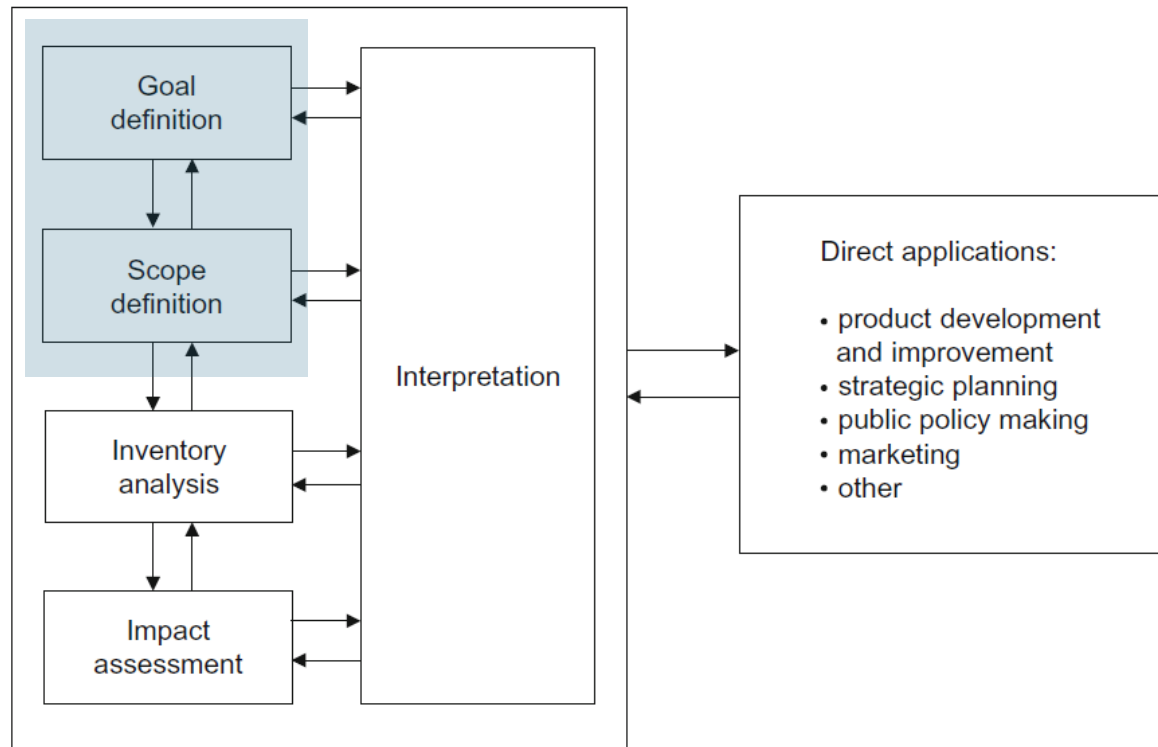
Einleitung

Motivation eine Lebenszyklusanalyse für einen Stahltank-Fernwärmespeicher durchzuführen



Methodik: Lebenszyklusanalyse nach ISO 14040/14044

Ziel und Untersuchungsrahmen

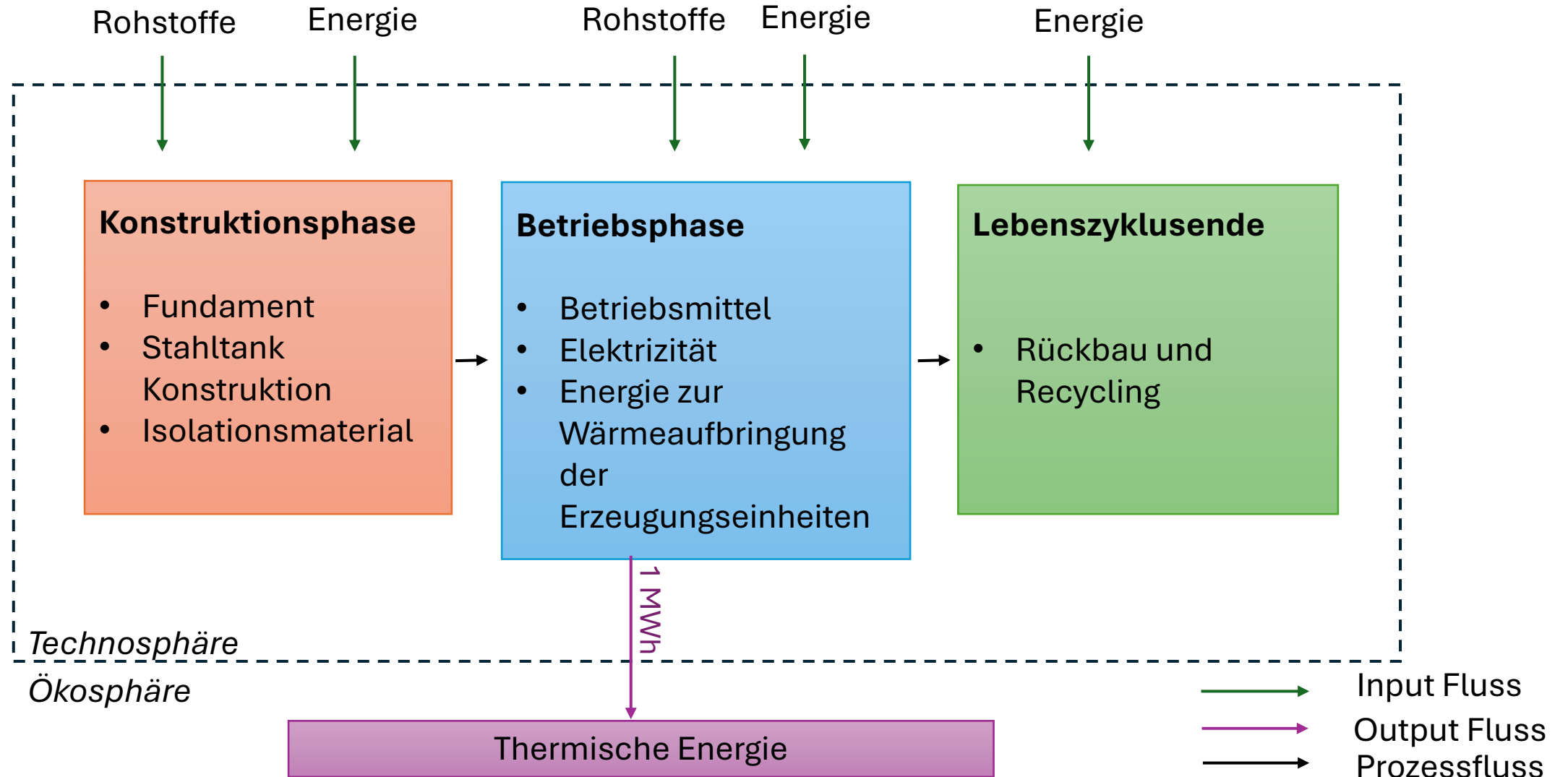


(Hauschild et al., 2018)

Ziel und Untersuchungsrahmen

- Erstellung des Produktsystems
- Geographische Systemgrenze: Linz (definiert durch das Fernwärmenetz)
- Energiemengen, die über den Speicher laufen, werden über ein Jahr gemittelt
- Die funktionelle Einheit ist 1 MWh thermische Energie, die an das Fernwärmenetz abgegeben wird
- Vergleich des Ist-Zustandes mit einem Fernwärmenetz ohne Fernwärmespeicher
“Was sind die ökologischen Auswirkungen eines Fernwärmespeichers in einem Fernwärmenetz?”

Produktsystem



Einleitung

Stahltankspeicher im Energiepark Linz Mitte der LINZ AG

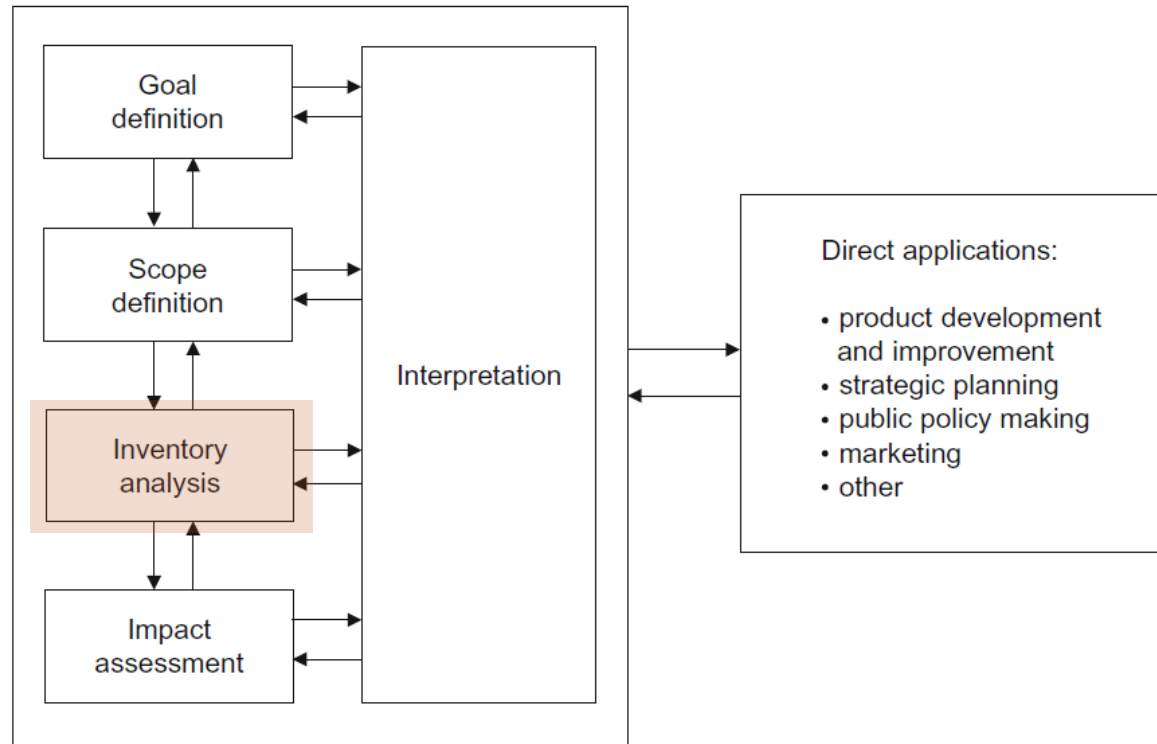
- Entkopplung von Wärmebedarf und Wärmeaufbringung möglich
- Speicherbauwerke helfen den Einsatz von Spitzenlastkesseln zu reduzieren
- Stromerzeugung kann mithilfe von Speichern ökonomisch optimiert werden
- 65 m hoher Tank mit 35 000 m³ Fassungsvermögen
- \cong 1 350 MWh thermischer Energie
- Temperatur: max. 97 °C
- Gefüllt mit Deionat



Quelle: Linz AG (2024): Erfahrungen aus dem Betrieb eines Fernwärmespeichers. Wirtschaftlichkeit der Energiespeicherung

Methodik: Lebenszyklusanalyse nach ISO 14040/14044

Sachbilanz



(Hauschild et al., 2018)

Sachbilanz

- Öffentlich verfügbare Daten der LINZ AG
- Energie-Input aus der Heat Merit Order
- Normen für Lebensdauer der eingesetzten Materialien
- Berechnungen basierend auf Fotos und Karten
- Berechnungen basierend auf Allokationsmethoden zu KWK-Anlagen
- Datenbank: Ecoinvent 3.11 cut-off
- Software: openLCA

(Moser et al. 2020; Rusch und Moser 2025)

Sachbilanz: wichtige Annahmen

- Lebenszeit des TTES wird mit 30 Jahren nach DIN EN 12952-4 angenommen
- Energie-Mix der Szenarien stammt aus dem Heat-Merit-Order Tool und nimmt 110 GWh gespeicherte Energie an (~98 volle Be- und Entladezyklen pro Jahr)
- Allokations-Faktoren nach Exergie-Methode angewandt (Buchenau et al., 2023):

$$spec. GHG_{th} = \frac{spec. GHG_{in} \cdot \frac{\eta_c \cdot \eta_{th}}{\eta_{el} + (\eta_c \cdot \eta_{th})} \cdot W_{in}}{W_{out,th}} \quad (1)$$

- Allokations-Faktoren nach Finnischer Methode angewandt (Buchenau et al., 2023):

$$PES = 1 - \frac{1}{\frac{\eta_{el}}{\eta_{el,ref}} + \frac{\eta_{th}}{\eta_{th,ref}}} \quad (2)$$

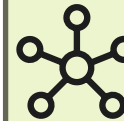
$$spec. GHG_{th} = \frac{spec. GHG_{in} \cdot (1 - PES) \cdot \frac{\eta_{th}}{\eta_{th,ref}} \cdot W_{in}}{W_{out,th}} \quad (3)$$

Sachbilanz: Energiemix der Szenarien



Fernwärmespeicher im Netz

- Wenn die Stromerlöse hoch sind, wird Wärme aus dem KWK im Speicher zwischengespeichert
- Der Spitzenlastkessel, der sowohl kosten- als auch CO₂-intensiv ist, kommt weniger zum Einsatz
- Die jährlich entladene Energiemenge entspricht 110 GWh



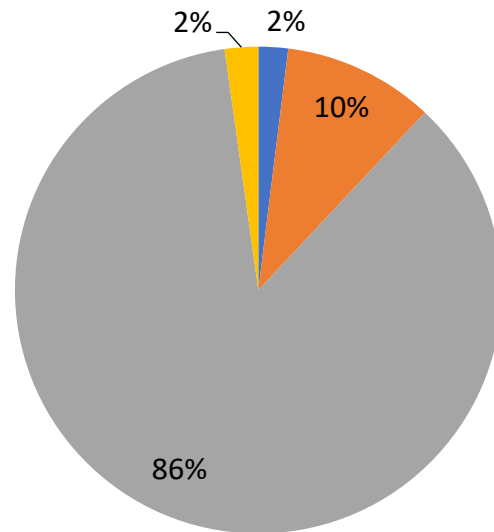
Kein Fernwärmespeicher

- Keine Zwischenspeicherung der Wärme nach ökonomisch optimiertem KWK-Einsatz möglich
- Spitzenlastkessel müssen Lastspitzen des Wärmebedarfs decken
- Der Anteil an Wärmeerzeugung aus KWK ist reduziert
- 110 GWh betrachtet

Sachbilanz: Energiemix der Szenarien mit und ohne Speicher

Berechnet mithilfe des Heat-Merit-Order Tools bezogen auf die 110 GWh

Wärmeaufbringung mit Speicher



■ RHKW ■ BIO ■ KWK ■ SLK

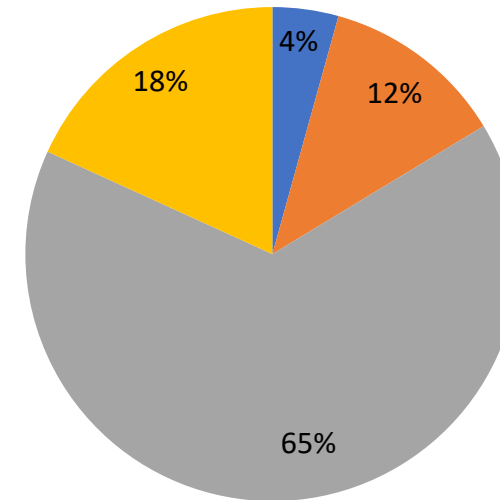
RHKW: Reststoffheizkraftwerk

BIO: Biomasse

KWK: Kraftwärmekopplung

SLK: Spitzenlastkessel

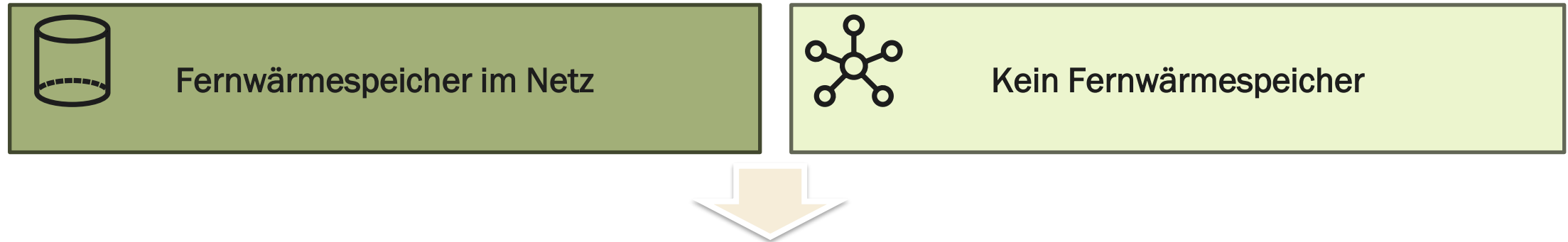
Wärmeaufbringung ohne Speicher



■ RHKW ■ BIO ■ KWK ■ SLK

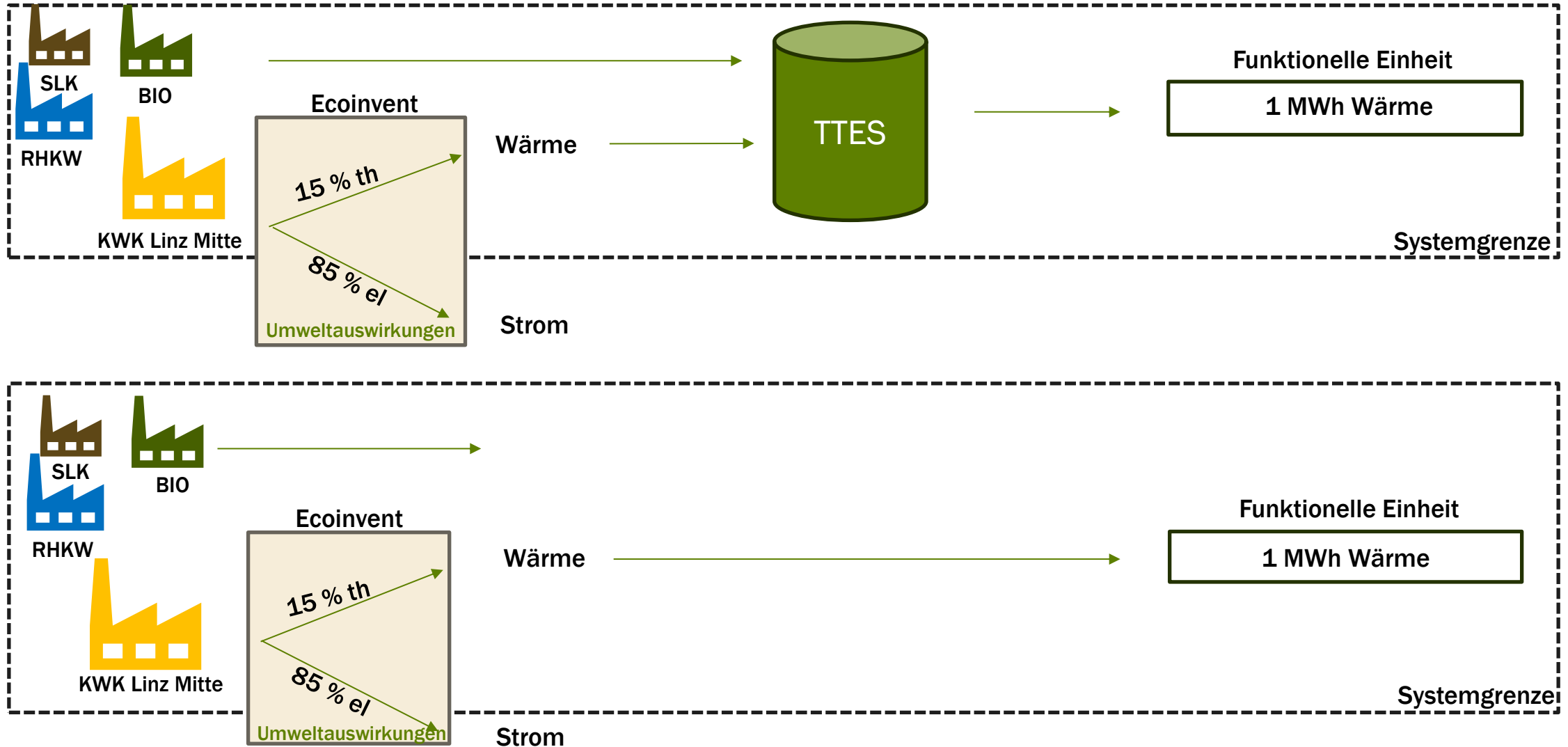
(Moser et al. 2020; Rusch und Moser 2025)

Sachbilanz: Energiemix der Szenarien

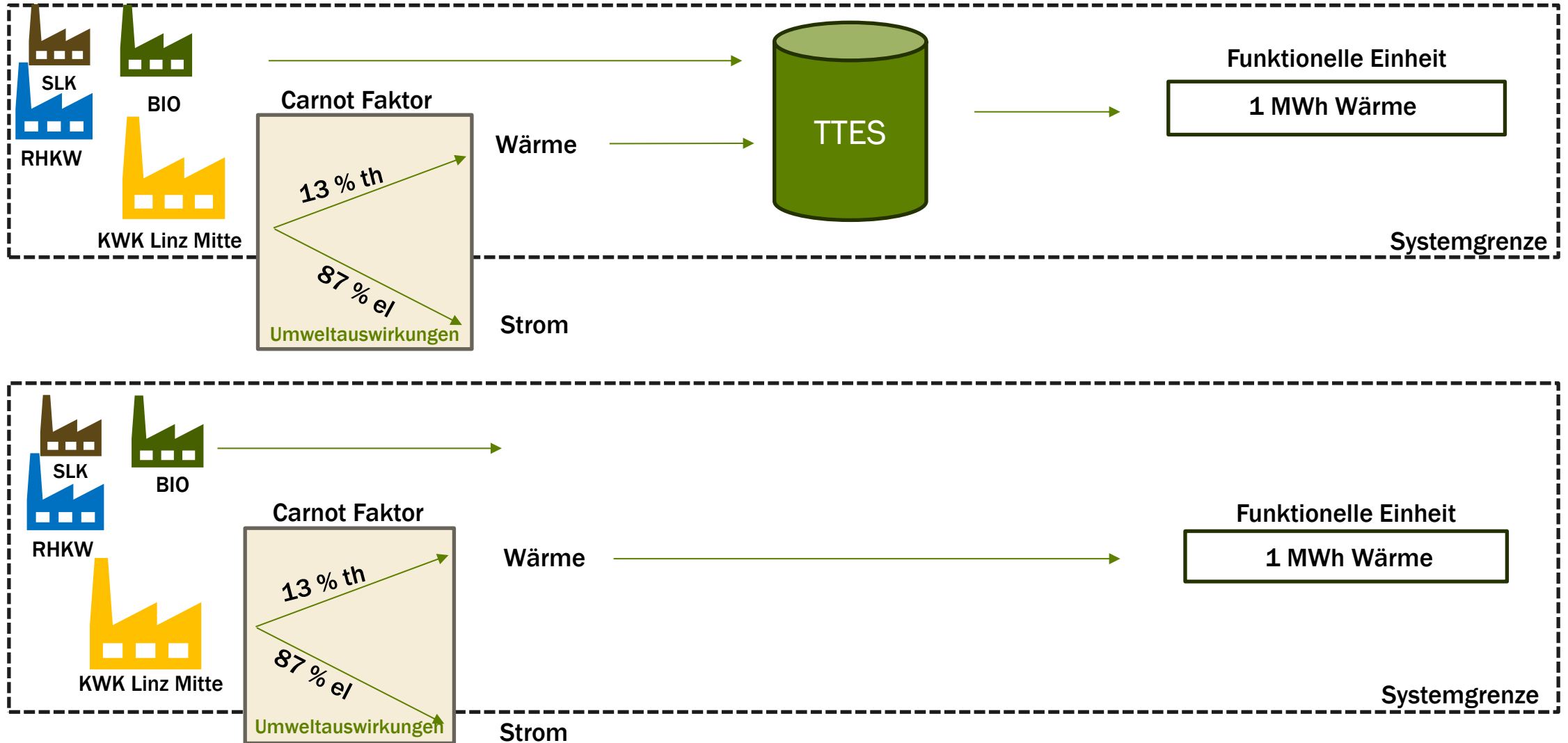


BAU Szenarien	Referenz Szenarien	Allokation
S1_TTES	S1_noTTES	Ecoinvent cut-off 3.11 Exergie-basierte Allokation
S2-a_TTES_Carnot	S2-a_noTTES_Carnot	Exergie-basierte Allokation – fallspezifisch
S2-b_TTES_Finnish	S2-b_noTTES_Finnish	Finnische Methode – fallspezifisch
S3-b_TTES_coal	S3_noTTES_coal	Systemerweiterung mit Substitution (Strom aus Kohle)
S3-c_TTES_convent	S3_noTTES_convent	Systemerweiterung mit Substitution (Strom aus Gaskraftwerk)
S3_TTES_wind	S3_noTTES_wind	Systemerweiterung mit Substitution (Strom aus Windkraft)
S4_TTES	S4_noTTES	Volle Systemerweiterung

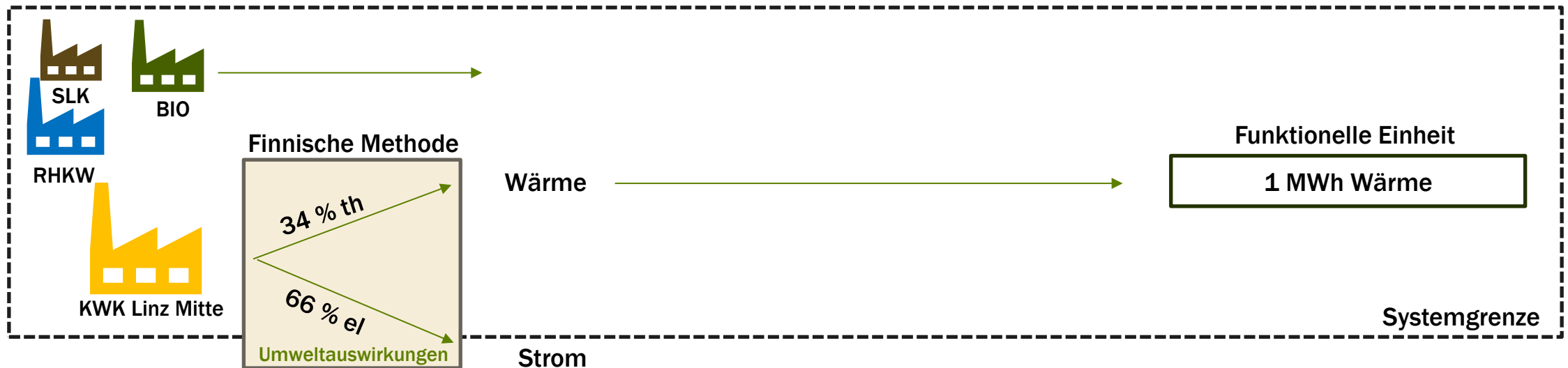
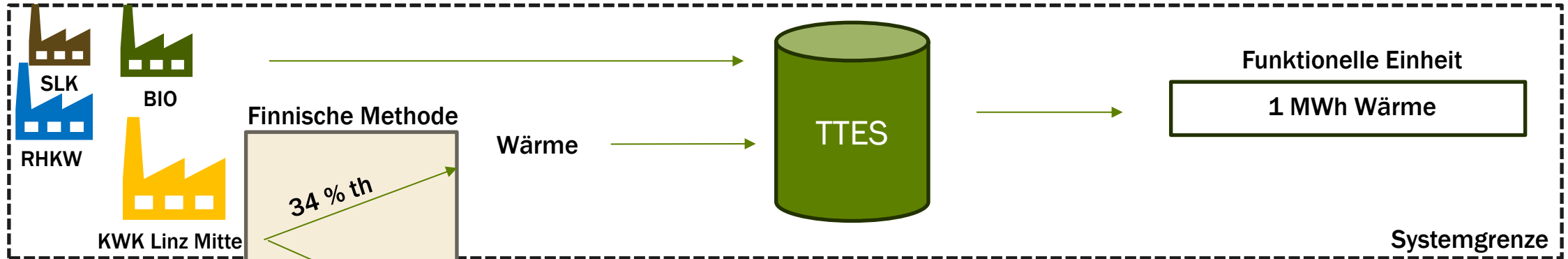
S1: Allokation Ecoinvent Datensatz (Exergie)



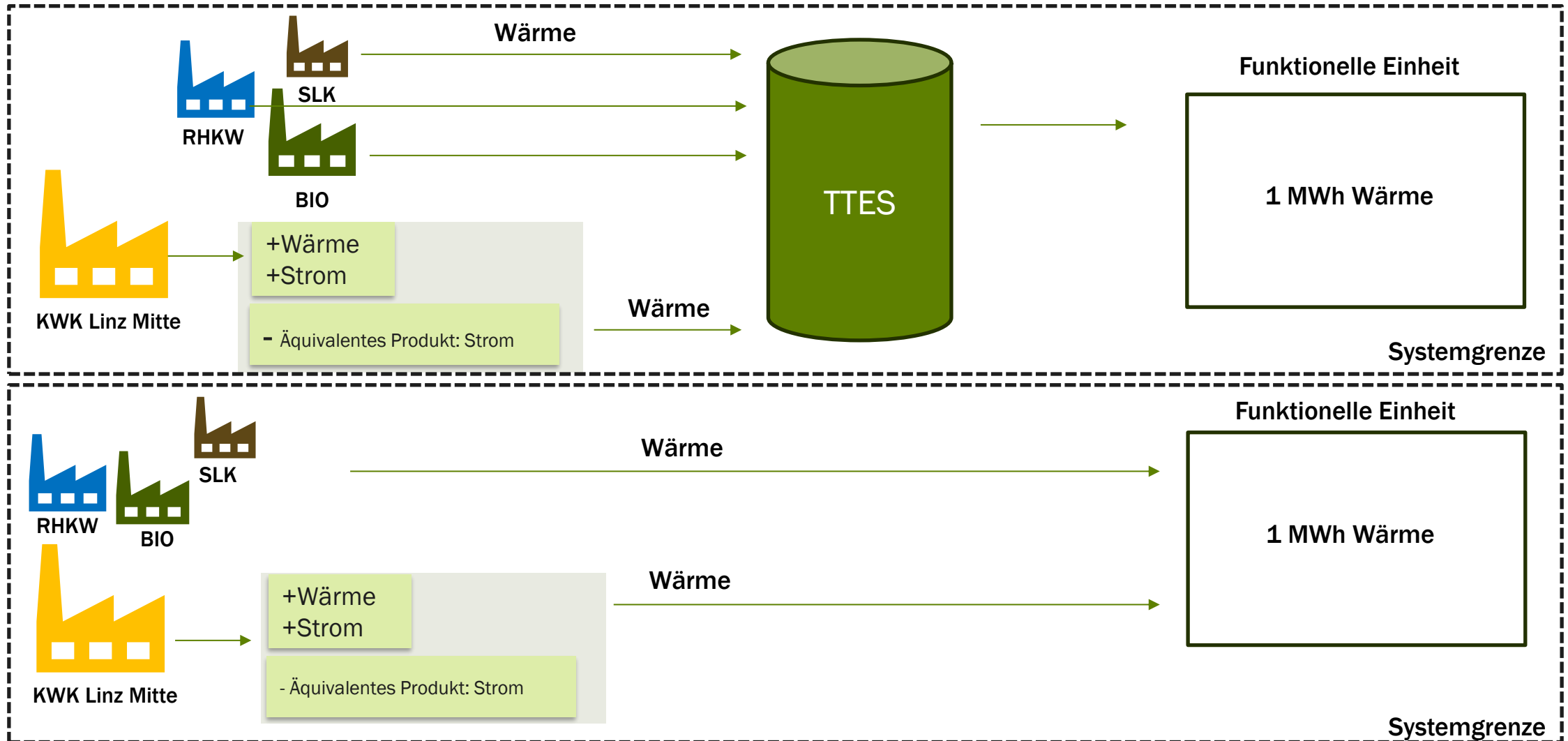
S2-a: Allokation nach Carnot-Faktoren (Exergie)



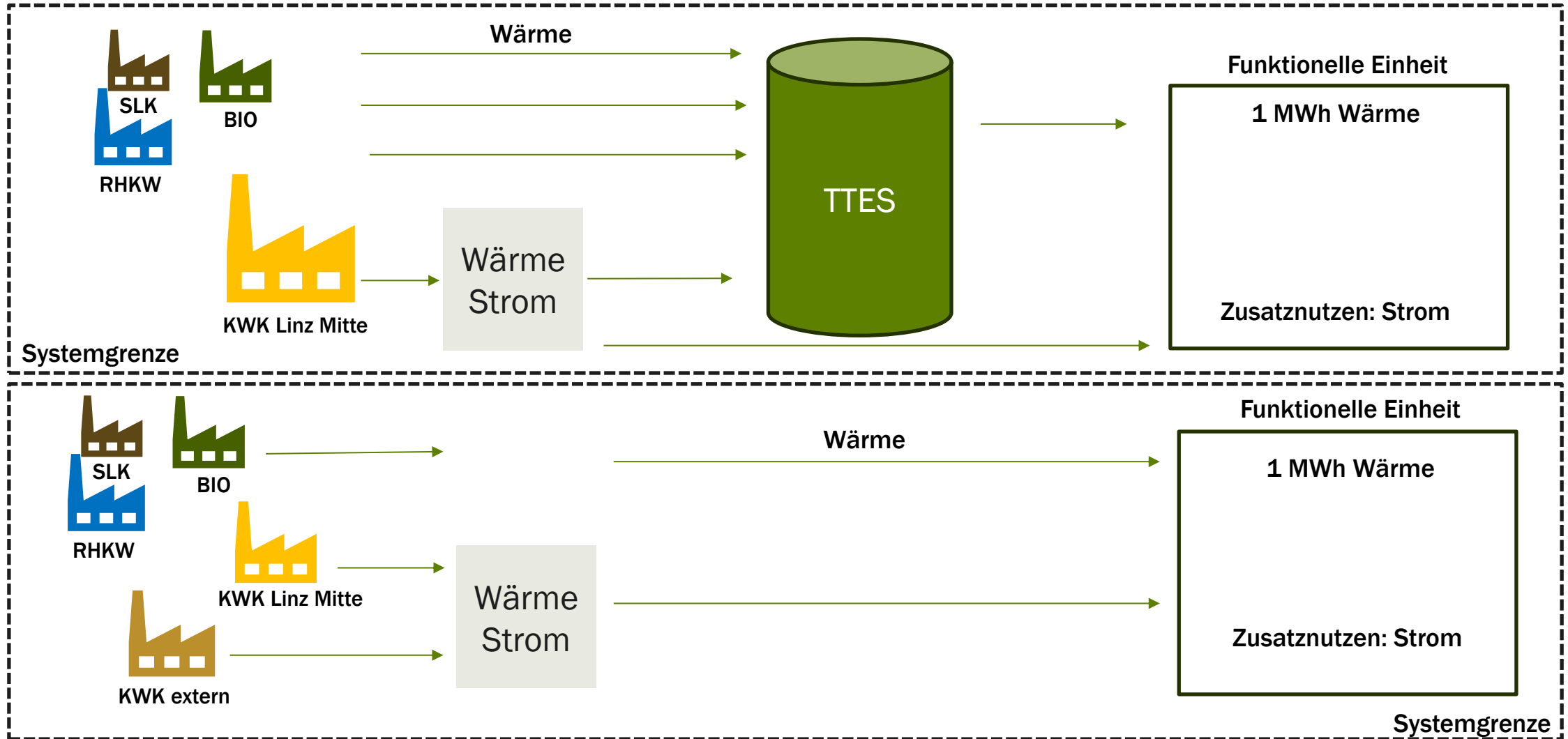
S2-b: Allokation nach Finnischer Methode



S3-a,b,c: Systemerweiterung mit Substitution (Kohle/Konvent./Wind)

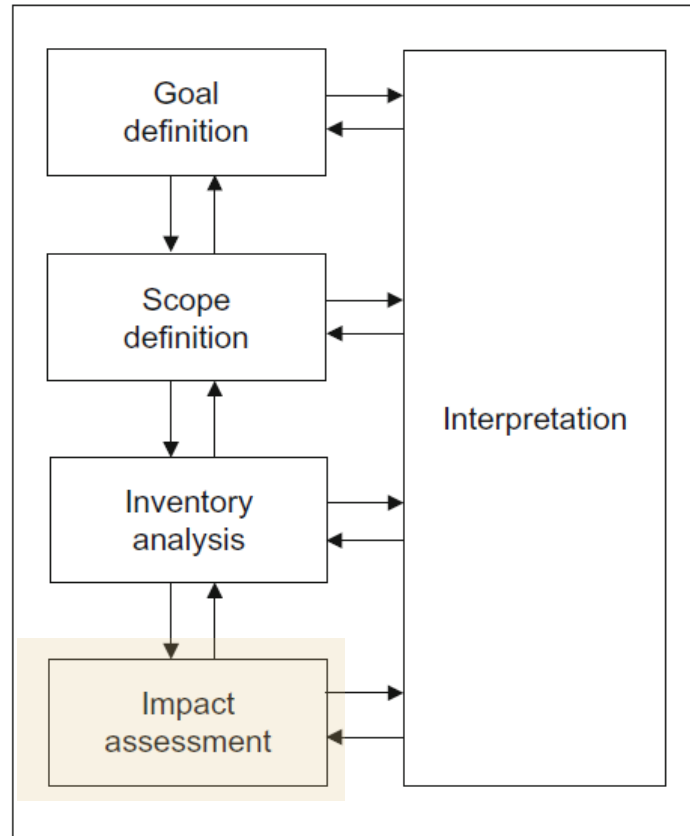


S4: Volle Systemerweiterung



Wirkungsabschätzung

ReCiPe 2016 – Mittelpunktindikatoren



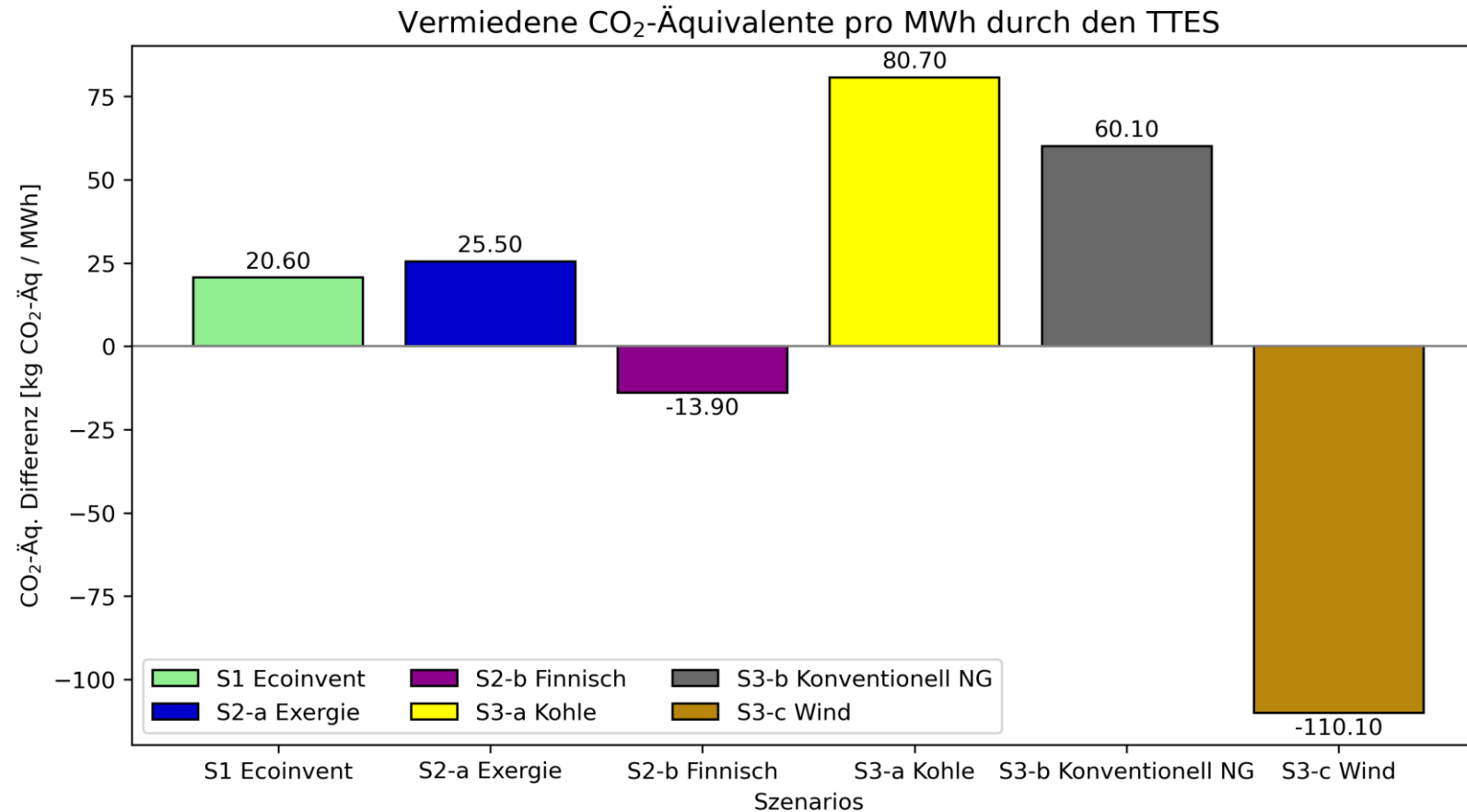
(Hauschild et al., 2018)

Impact Categories

- Acidification: terrestrial
- Climate change
- Ecotoxicity: freshwater
- Ecotoxicity: marine
- Ecotoxicity: terrestrial
- Energy resources, fossil
- Eutrophication: freshwater
- Eutrophication: marine
- Human toxicity: carcinogenic
- Human toxicity: non-carcinogenic
- Ionizing radiation
- Land use
- Material resources
- Ozone depletion
- Particulate matter formation
- Photochemical oxidant formation: human health
- Photochemical oxidant formation: terrestrial ecosystems
- Water use

Wirkungsabschätzung

Method: ReCiPe midpoint (H) Climate Change



Szenarien S1, S2-a und S2-b lassen sich auf einen *Shift* von Spitzenlastkessel zu Kraftwärmekopplungsanlagen zurückführen

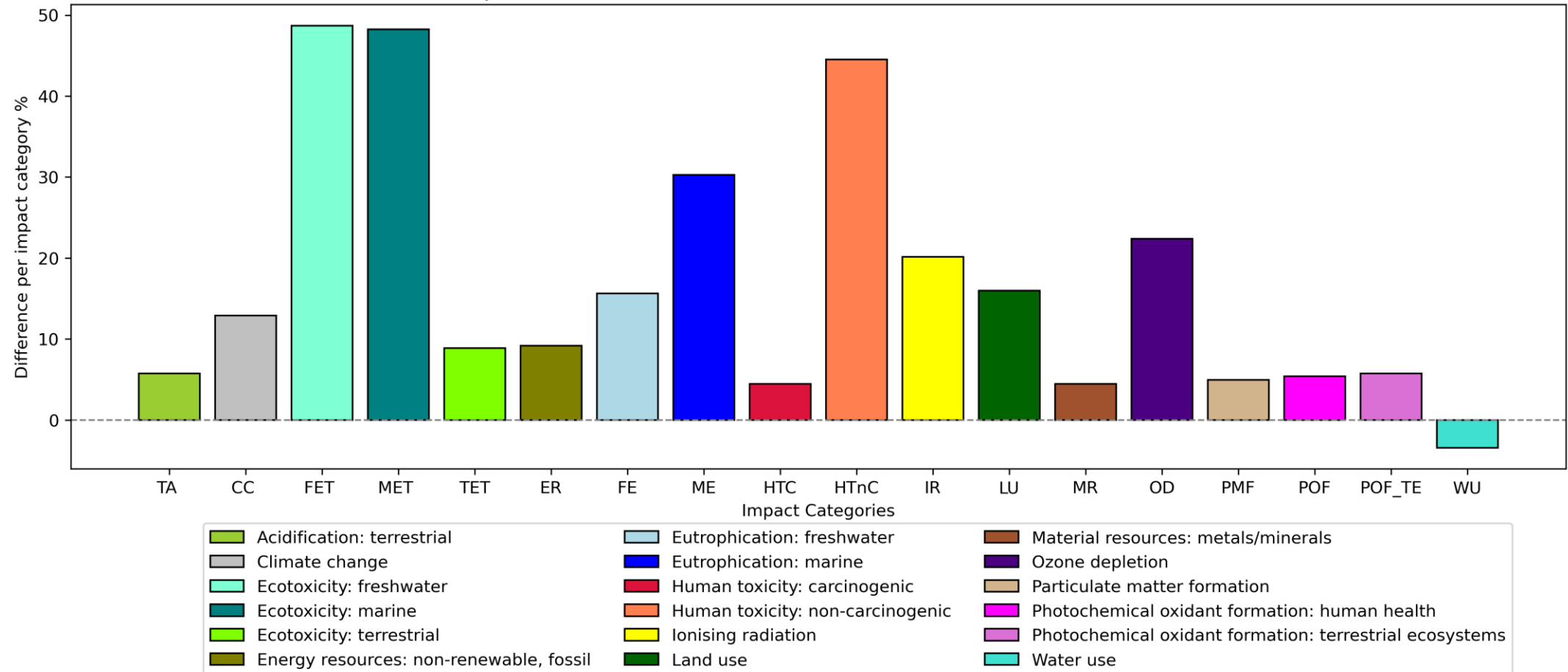
Szenarien S3-a, S3-b und S3-c ergeben sich *vor allem* dadurch, was der zusätzliche Kraftwärmekopplungsbetrieb außerhalb bewirkt

Quelle: Eigene Abbildung, Energieinstitut an der JKU Linz

Wirkungsabschätzung

Method: ReCiPe midpoint (H) Climate Change

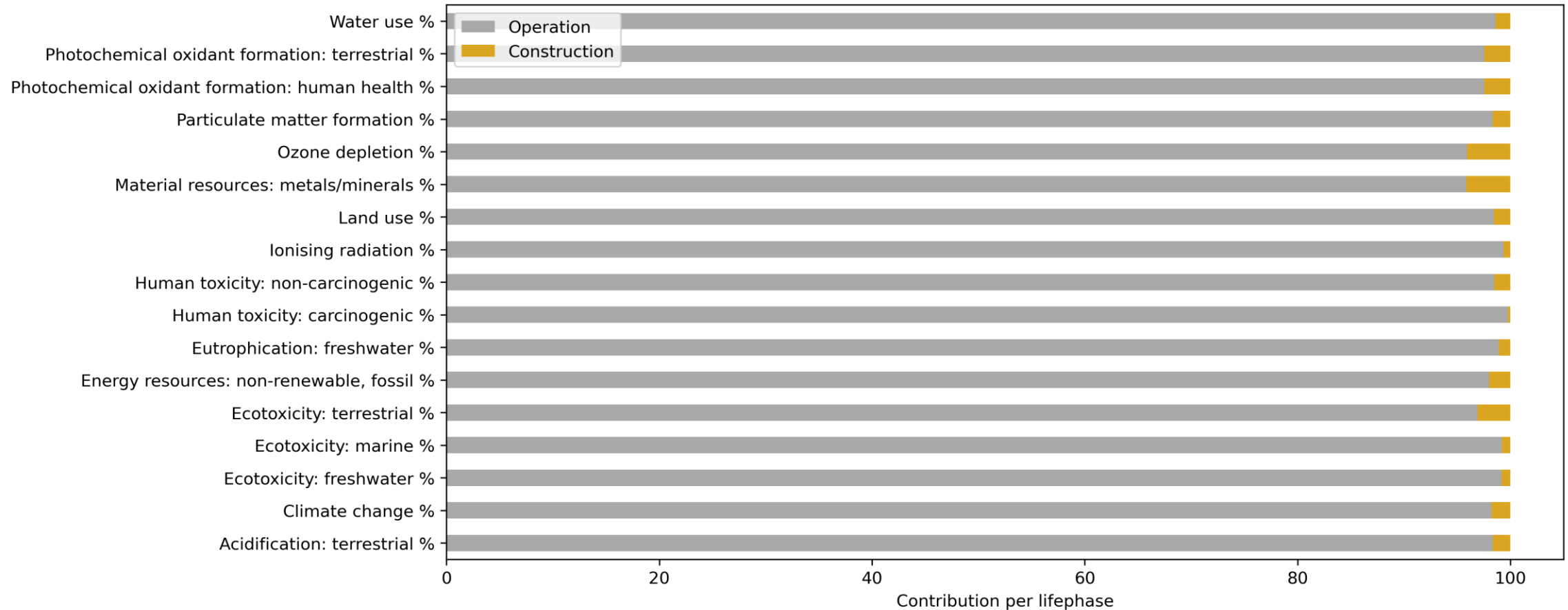
Impact Assessment after ReCiPe 2016 hierachist for S1



Quelle: Eigene Abbildung, Energieinstitut an der JKU Linz

Wirkungsabschätzung

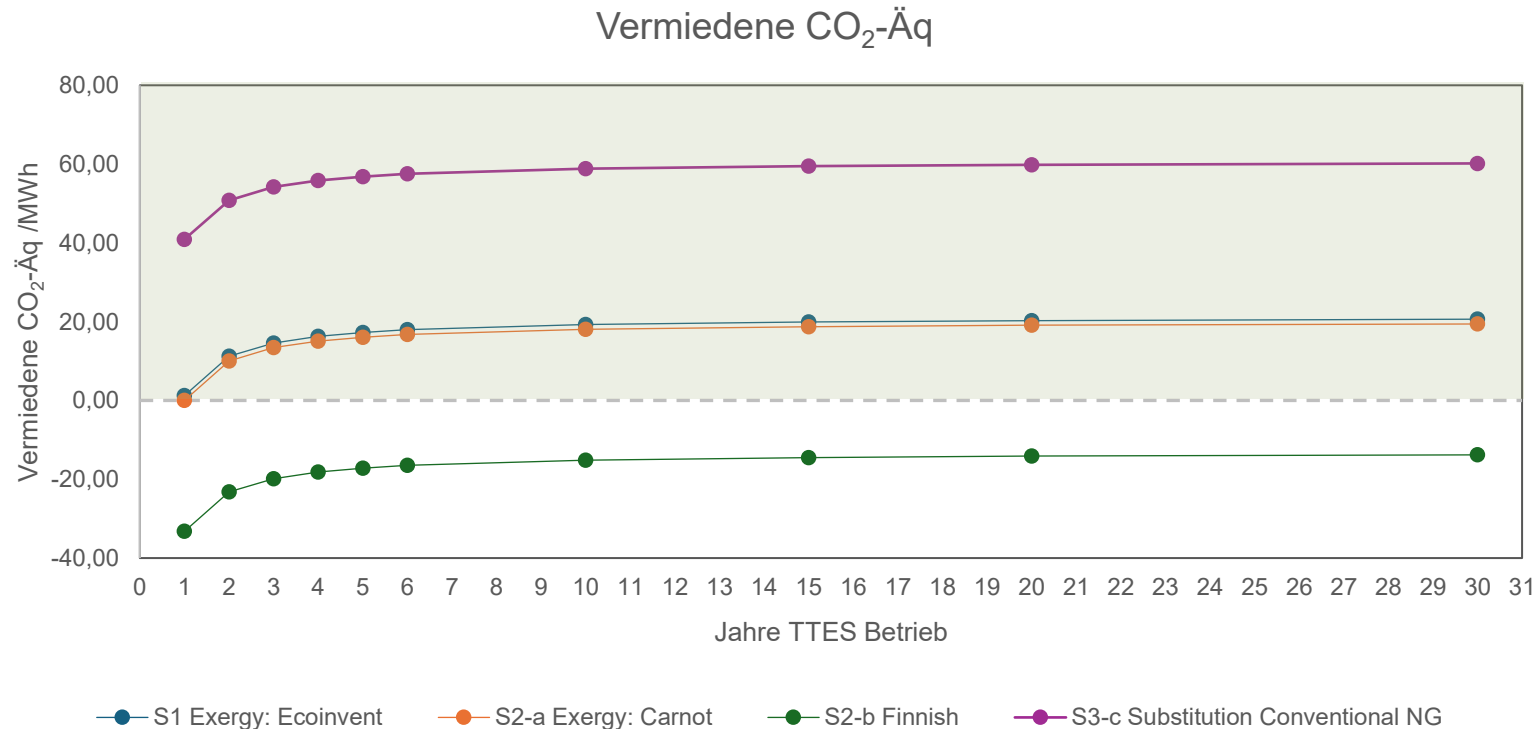
Methode: ReCiPe midpoint (H) Ergebnisse für funktionale Einheit 1 MWh für S1



Quelle: Eigene Abbildung, Energieinstitut an der JKU Linz

Wirkungsabschätzung

Methode: ReCiPe midpoint (H) Ergebnisse



- Exergie-basierte Allokationsmethoden gleichen die CO₂-Äquivalente im ersten Betriebsjahr aus
- Unter Anwendung der Finnischen Methode zeigen sich rechnerisch keine CO₂-Einsparungen über die Lebenszeit des TTES
- Mithilfe der Substitutionsmethode durch konventionelle Gaskraftwerke zeigen sich ab Einsatzbeginn bereits vermiedene CO₂-Äquivalente

Quelle: Eigene Abbildung, Energieinstitut an der JKU Linz

Schlussfolgerungen

Lebenszyklusanalyse eines Stahltankspeichers



Der Fernwärmespeicher Linz-Mitte dient dem optimierten Einsatz von KWK-Anlagen und hilft die Aufbringung aus den CO₂- und kostenintensiven Spitzenlastkesseln zu reduzieren.

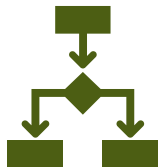


Die Bauphase des Speichers macht aufgrund des hohen Energiedurchsatzes nur knapp 1% der CO₂-Äquivalente über die gesamte Lebenszeit des Speicherbauwerks aus.



Das bedeutet: wenn Fernwärmenetze durch Speicherbauwerke CO₂-intensive Wärmaufbringung **durch CO₂-ärmere ersetzen können**, gleichen sich die Umweltauswirkungen durch den Bau bereits am Beginn des Einsatzes aus.

Ersetzt der Speicherbau die gleiche Erzeugungseinheit (KWK speichert ein, KWK speichert aus) resultiert das nach LCA-Methodik in keinem ökologischen Nutzen.

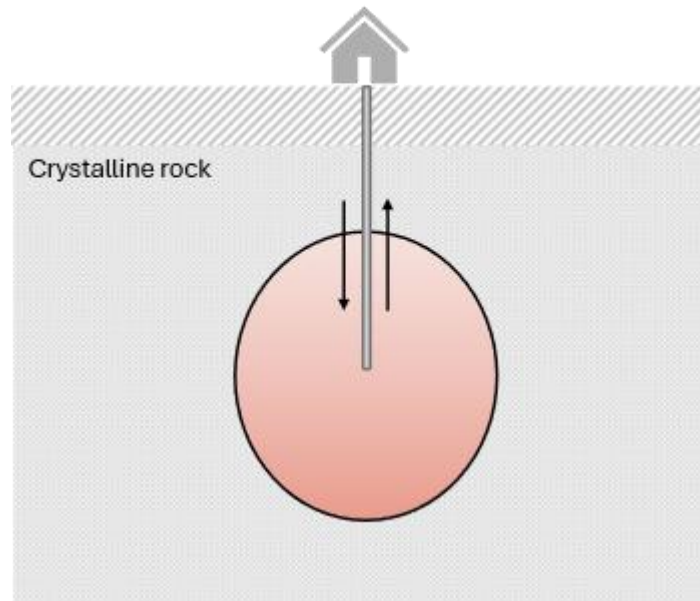


Eine fundamentale Herausforderung zur Bewertung des Einsatzes eines thermischen Speicherbauwerkes liegt in der **Vielzahl an objektiv und normgerecht anwendbaren Allokationsmethoden**. Die Wahl der Allokationsmethode hat erheblichen Einfluss auf das Ergebnis der Lebenszyklusanalyse und muss daher individuell interpretiert werden.

Ausblick

Lebenszyklusanalyse andere Großwärmespeicher

Cavern thermal energy storage (CTES)



Pit thermal energy storage (PTES)



Quelle: Eigene Abbildung, Energieinstitut an der JKU Linz

Förderquellen



Diese Arbeit wurde durch Mittel des Klima- und Energiefonds im Rahmen des Projekts HEATROCK (Projektnummer: F0999915039) gefördert.



This project has received funding from the European Union's Horizon Europe research and innovation programme under the grant agreement No 101136095.

Vielen Dank!

Helene Mihatsch

Junior Researcher

mihatsch@energieinstitut-linz.at



Energieinstitut an der JKU Linz | Altenberger Straße 69 | 4040 Linz | Austria

Methoden Details

ReCiPe (2016) in hierarchist perspective

Table 1.3. Value choices in the derivation of characterization factors, as included in ReCiPe2016.

	Individualist	Hierarchist	Egalitarian
Climate change			
Time horizon ¹	20 years	100 years	1,000 years
Climate-carbon feedbacks non-CO ₂	No	Yes	No
Future socio-economic developments ²	Optimistic	Baseline	Pessimistic
Adaptation potential ²	Adaptive	Controlling	Comprehensive
Ozone depletion			
Time horizon ¹	20 years	100 years	Infinite
Included effects ²	Skin cancer	Skin cancer	Skin cancer and cataract
Ionizing radiation			
Time horizon ¹	20 years	100 years	100,000 years
Dose and dose rate effectiveness factor (DDREF) ²	10	6	2
Included effects ²	-Thyroid, bone marrow, lung and breast cancer -Hereditary disease	-Thyroid, bone marrow, lung, breast, bladder, colon, ovary, skin, liver, oesophagus and stomach cancer -Hereditary disease	-Thyroid, bone marrow, lung, breast, bladder, colon, ovary, skin, liver, oesophagus, stomach, bone surface and remaining cancer -Hereditary disease
Fine particulate matter formation			
Included effects ²	Primary aerosols	Primary aerosols, secondary aerosols from SO ₂	Primary aerosols, secondary aerosols from SO ₂ , NH ₃ and NO _x
Toxicity			
Time horizon ¹	20 years	100 years	Infinite
	Individualist	Hierarchist	Egalitarian
Exposure routes for human toxicity ¹	Organics: all exposure routes. Metals: drinking water and air only	All exposure routes for all chemicals	All exposure routes for all chemicals
Environmental compartments for marine ecotoxicity ¹	Sea + ocean for organics and non-essential metals. For essential metals, the sea compartment is included only, excluding the oceanic compartments.	Sea + ocean for all chemicals	Sea + ocean for all chemicals
Carcinogenicity ¹	Only chemicals with carcinogenicity classified as 1, 2A, 2B by IARC	All chemicals with reported carcinogenic effects	All chemicals with reported carcinogenic effects
Minimum number of tested species for ecotoxicity ¹	4	1	1

Quelle: (Huijbregts et al., 2016): Huijbregts, M. A., Steinmann, Z. J., Elshout, P. M., Stam, G., Verones, F., Vieira, M. D. M., ... & van Zelm, R. (2016). ReCiPe 2016: a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level report I: characterization.

Methoden Details

ReCiPe (2016) in hierarchist perspective

Water use			
Regulation of stream flow ²	High	Standard	Standard
Water requirement for food production ²	1000 m ³ /yr/capita	1350 m ³ /yr/capita	1350 m ³ /yr/capita
Impacts on terrestrial ecosystems considered ²	No	Yes	Yes
Mineral resource scarcity			
Future production	Reserves	Ultimate recoverable resource	Ultimate recoverable resource

Quelle: (Huijbregts et al., 2016): Huijbregts, M. A., Steinmann, Z. J., Elshout, P. M., Stam, G., Verones, F., Vieira, M. D. M., ... & van Zelm, R. (2016). ReCiPe 2016: a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level report I: characterization.