



TECHNO-ÖKONOMISCHE OPTIMIERUNG INDUSTRIELLER MULTIENERGIESYSTEME

HERAUSFORDERUNGEN DER OPTIMIERUNG

LUKAS WECHNER

THOMAS KIENBERGER

12.02.2026

AGENDA

- Motivation und Vision
- Methodik Überblick
- Entwicklung des Netzwerkmodells
- Mathematische Interpretation
- Optimierung von „BI-Objektiv-Networks“
- Konvexe und nicht-konvexe Situationen
- Erwartete Ergebnisse und Synthese
- Szenarienmodellierung in NEFI
- Fragen



MOTIVATION UND VISION

KLIMANEUTRALITÄT UND DIE ROLLE DER INDUSTRIE

Zielsetzung des European Green Deal, Clean Industrial Deal 2050, österreichische nationale Ziele 2040

Österreichische Industrie, verantwortlich für:

- 44 % (30,4 Mio. tCO₂, 2023) der österreichischen Treibhausgasemissionen
- 25 % (119,46 Mrd. Euro, 2023) des österreichischen BIP
- 24,9 % (1,02 Mio) Mitarbeiter

"Wie können klimaneutralen Transformationspfade der österreichische Industrie unter Einbezug von sozio-technischen-, ökonomischen- und Resilienz- Aspekten aussehen?"

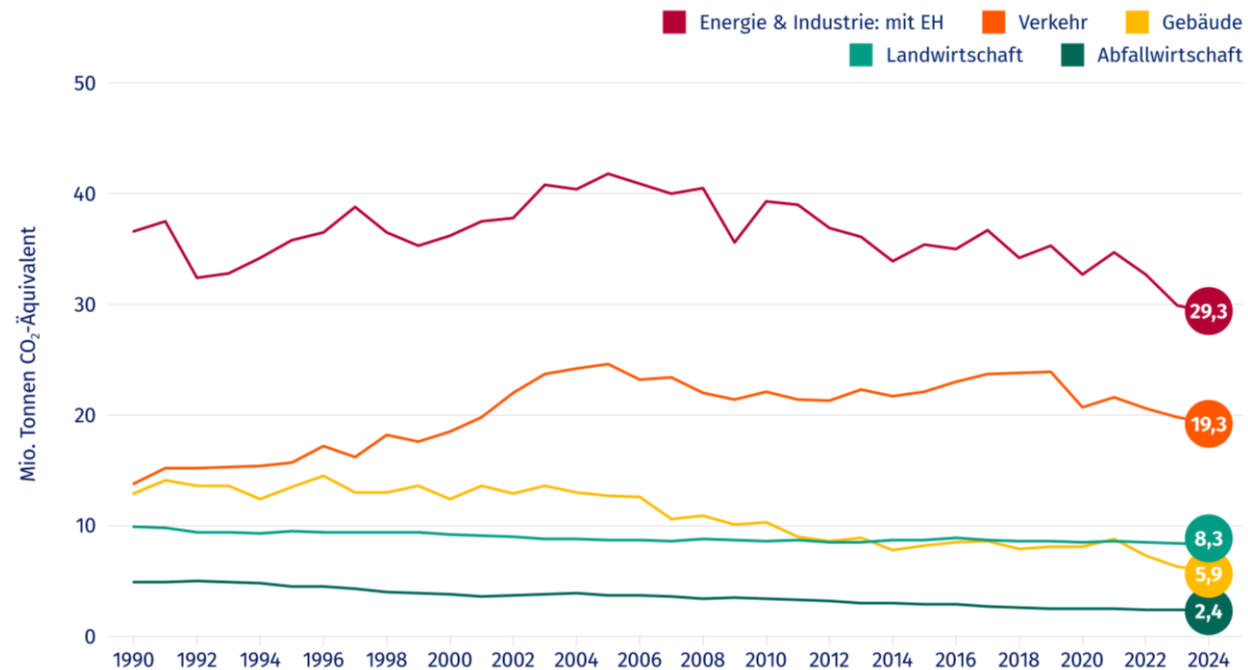


Abbildung1: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen nach Sektoren in Österreich (Wien Energie Positionen, Umweltbundesamt, 9.12.2025)
entwicklung-von-treibhausgasemissionen-in-oesterreich-nach-sektoren-1990-2024.png (12499x8333)

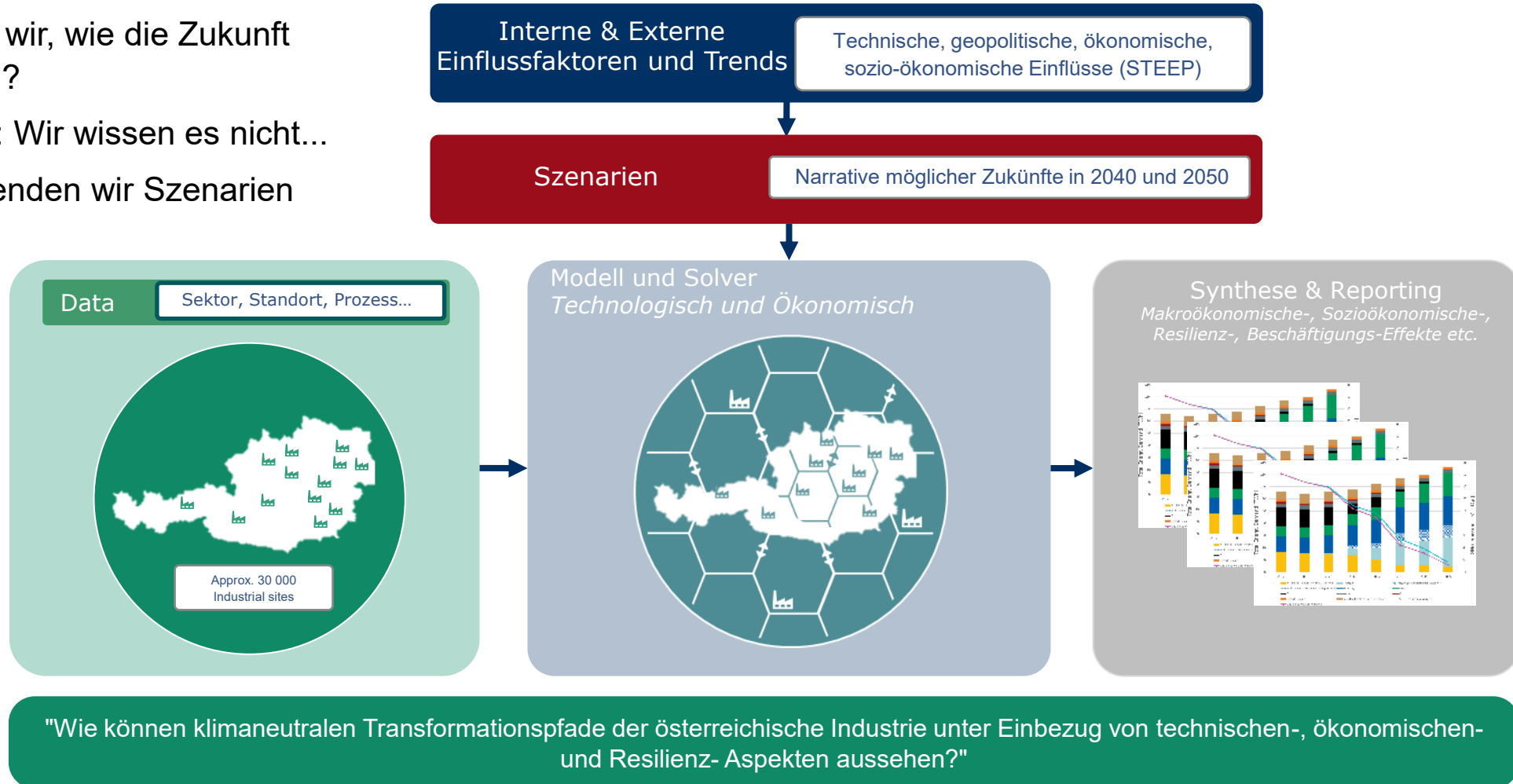
METHODIK ÜBERBLICK

ADRESSIEREN DER HAUPTFORSCHUNGSFRAGE

Woher wissen wir, wie die Zukunft aussehen wird?

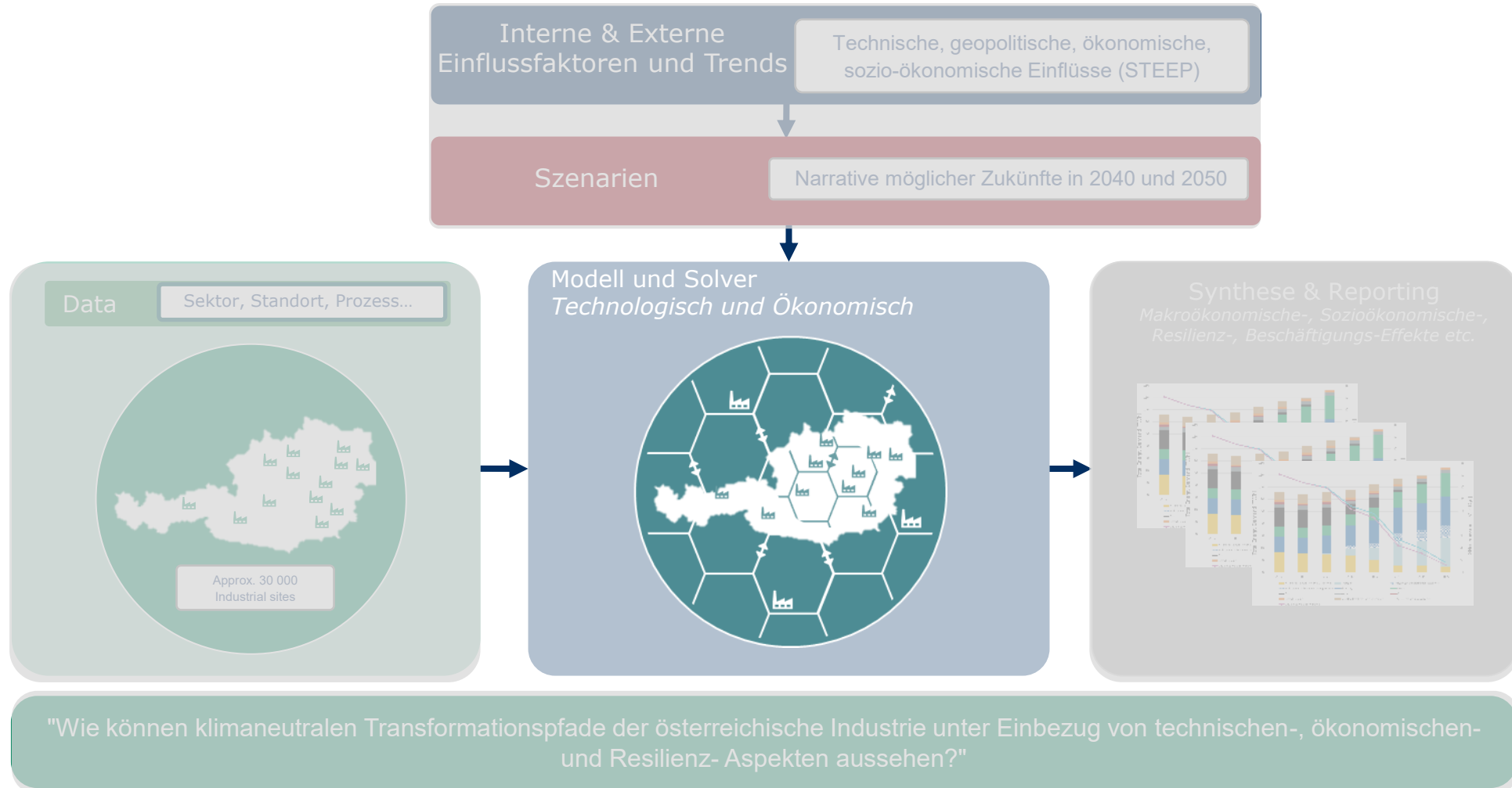
Kurze Antwort: Wir wissen es nicht...

Deshalb verwenden wir Szenarien



METHODIK ÜBERBLICK

ADRESSIEREN DER HAUPTFORSCHUNGSFRAGE

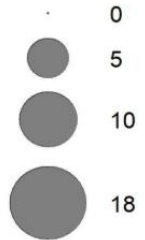


MODELL DER ÖSTERREICHISCHEN INDUSTRIE

ENTWICKLUNG DES NETZWERK MODELLS

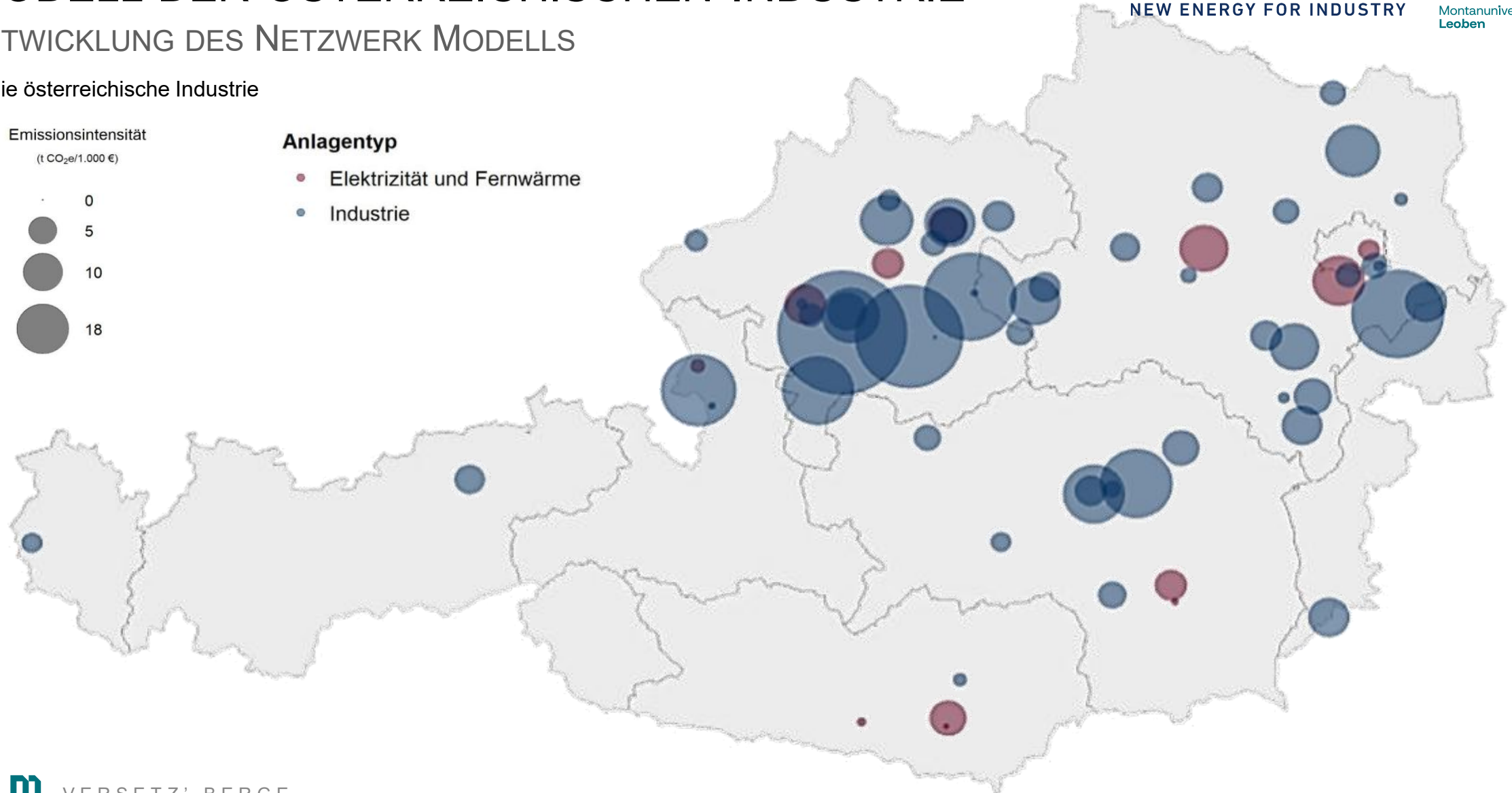
Die österreichische Industrie

Emissionsintensität
(t CO₂e/1.000 €)



Anlagentyp

- Elektrizität und Fernwärme
- Industrie

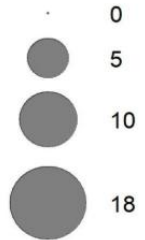


MODELL DER ÖSTERREICHISCHEN INDUSTRIE

ENTWICKLUNG DES NETZWERK MODELLS

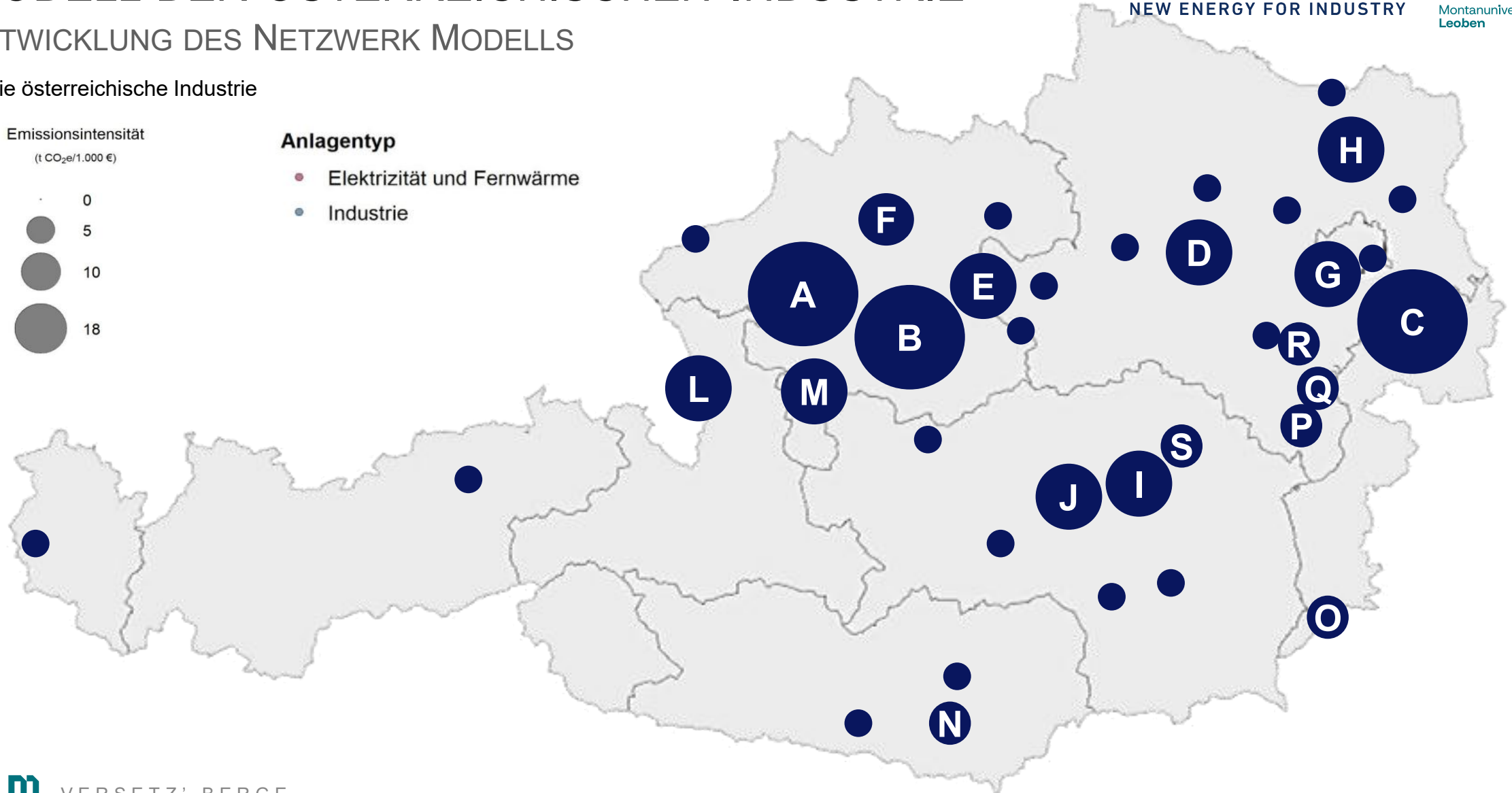
Die österreichische Industrie

Emissionsintensität
(t CO₂e/1.000 €)



Anlagentyp

- Elektrizität und Fernwärme
- Industrie

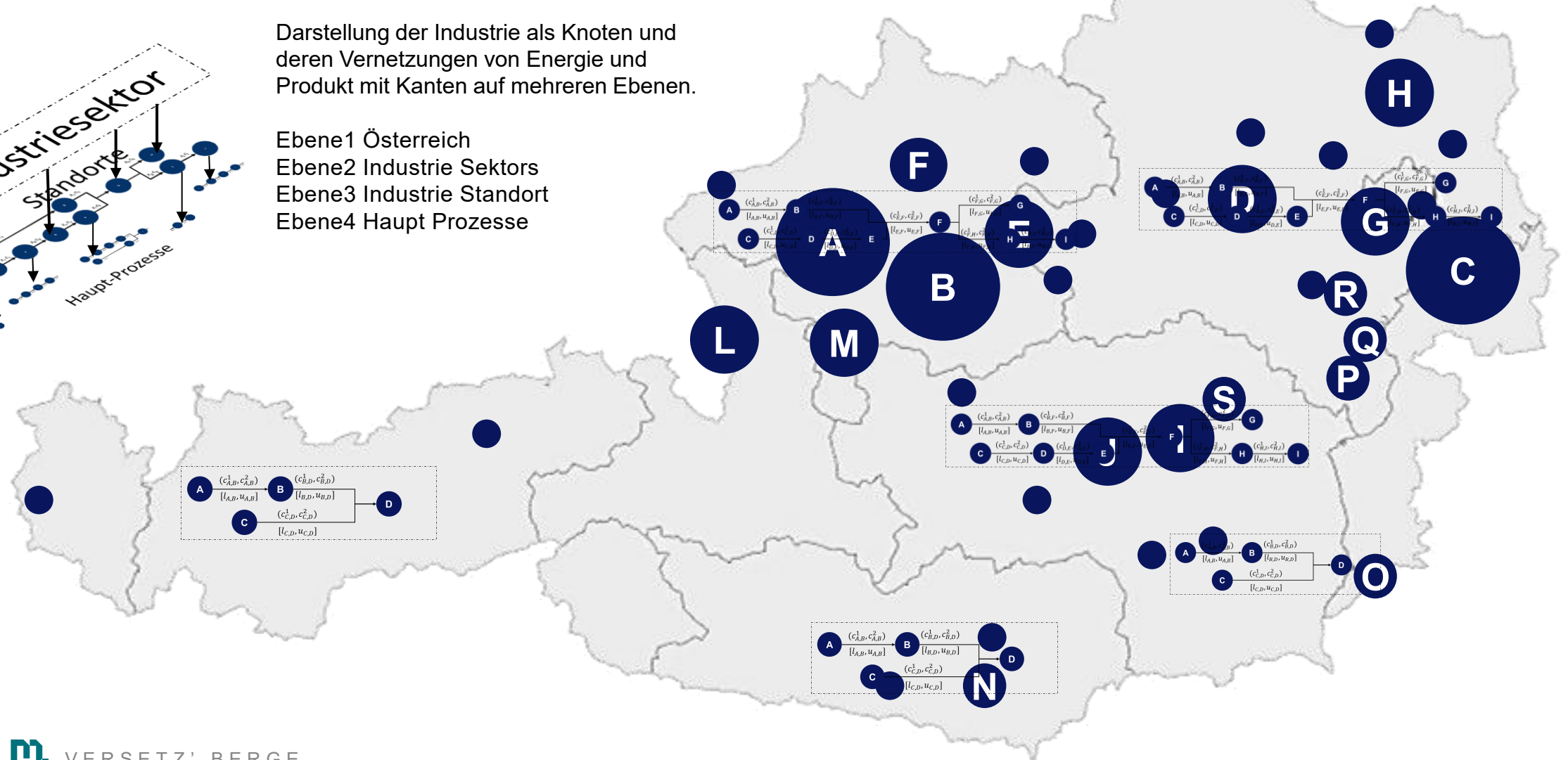
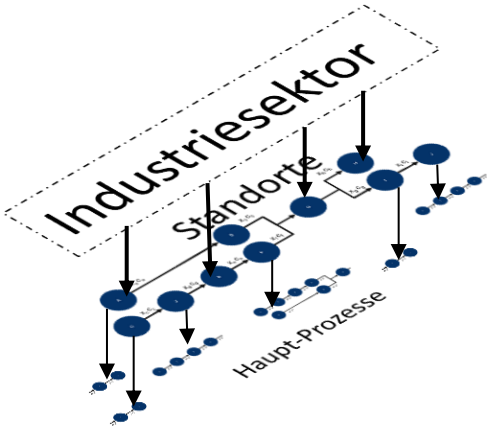


MODELL DER ÖSTERREICHISCHEN INDUSTRIE

ENTWICKLUNG DES NETZWERK MODELLS

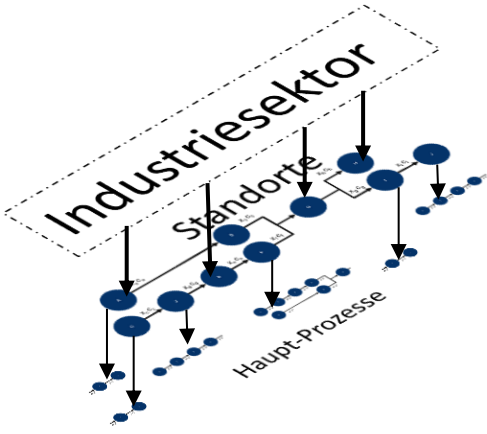
Darstellung der Industrie als Knoten und deren Vernetzungen von Energie und Produkt mit Kanten auf mehreren Ebenen.

- Ebene1 Österreich
- Ebene2 Industrie Sektors
- Ebene3 Industrie Standort
- Ebene4 Haupt Prozesse



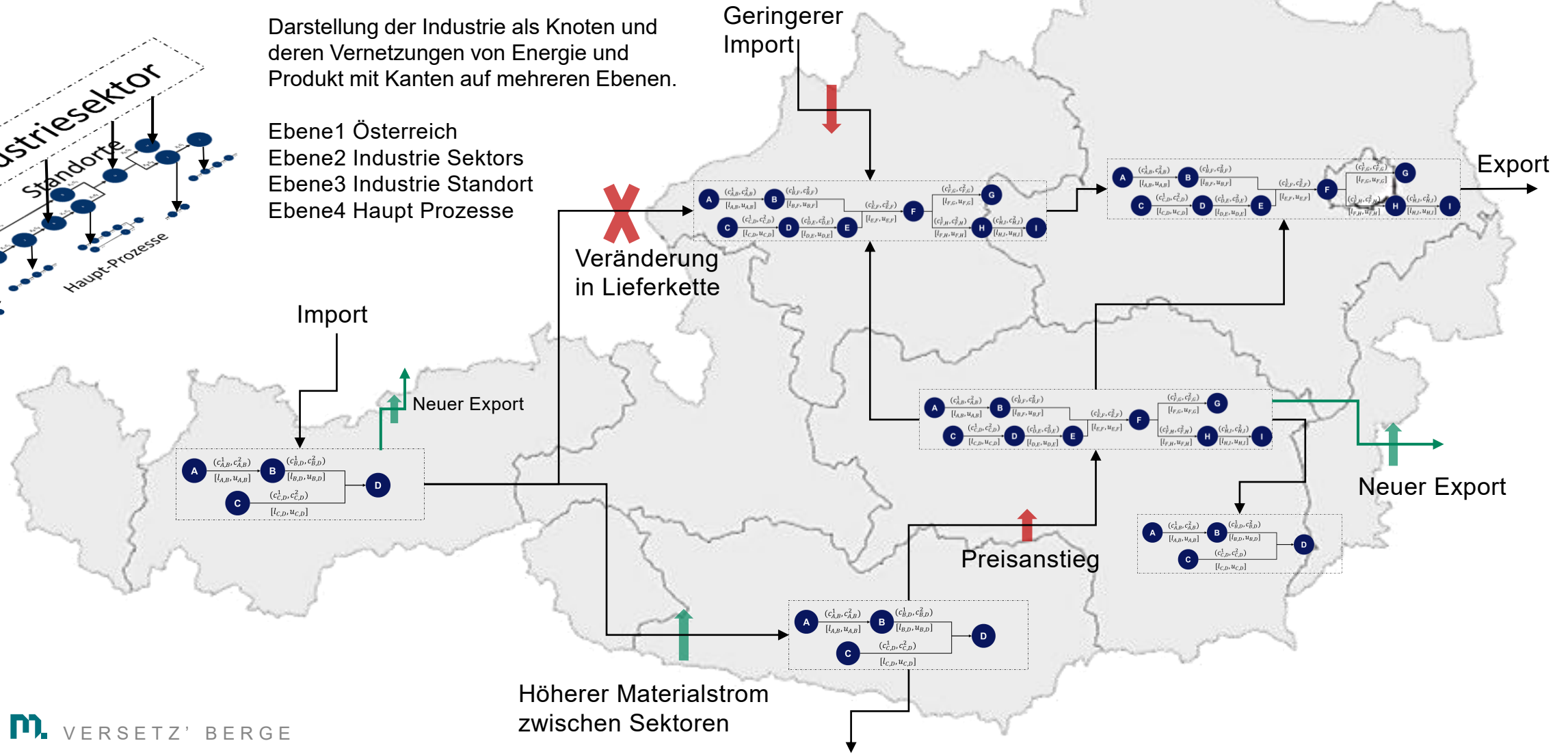
MODELL DER ÖSTERREICHISCHEN INDUSTRIE

ENTWICKLUNG DES NETZWERK MODELLS



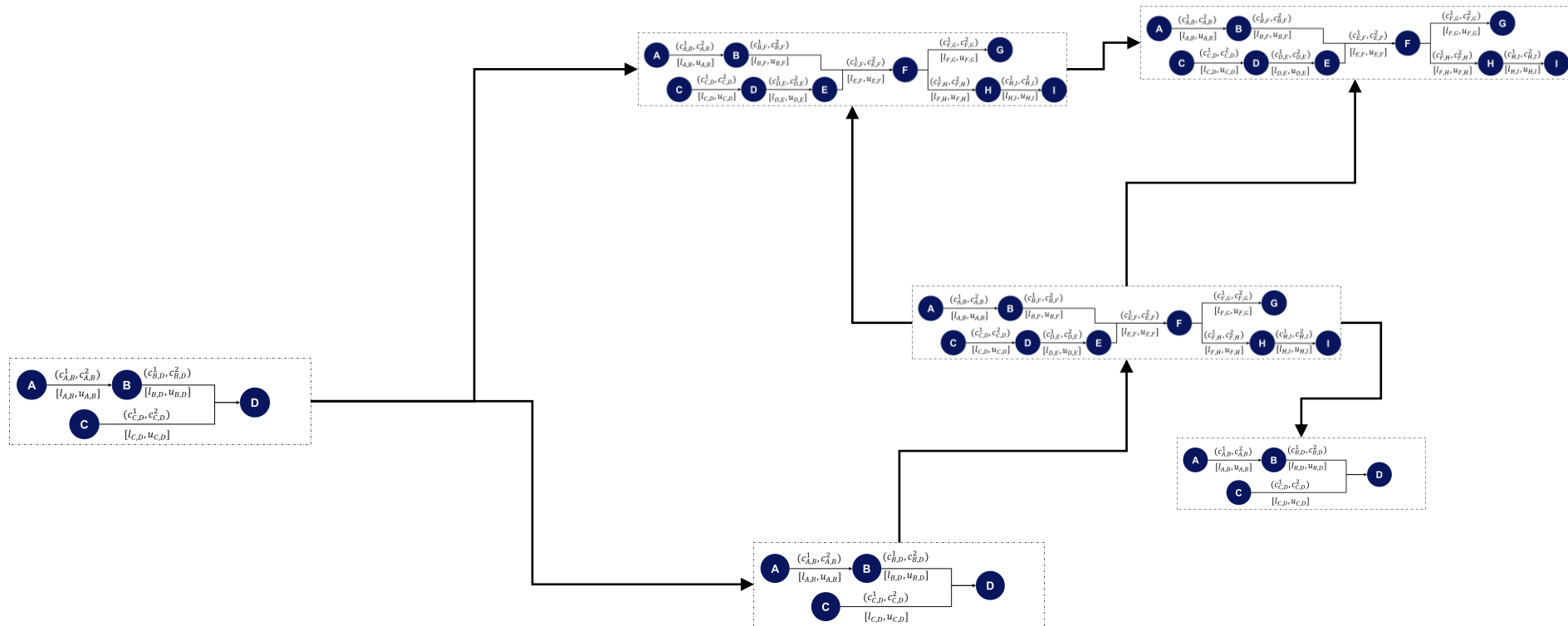
Darstellung der Industrie als Knoten und deren Vernetzungen von Energie und Produkt mit Kanten auf mehreren Ebenen.

- Ebene1 Österreich
- Ebene2 Industrie Sektors
- Ebene3 Industrie Standort
- Ebene4 Haupt Prozesse



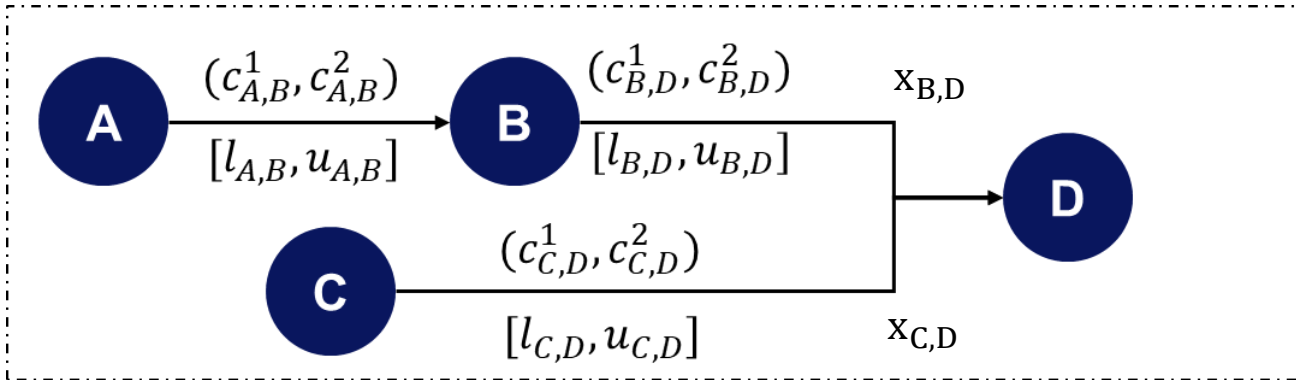
MODELL DER ÖSTERREICHISCHEN INDUSTRIE

MATHEMATISCHE INTERPRETATION



MODELL DER ÖSTERREICHISCHEN INDUSTRIE

MATHEMATISCHE INTERPRETATION



Zielfunktion 1, minimiere:

$$\text{Gesamtkosten } \dot{c}_{\text{ges}} = f_1(x) = \sum_{(i,j)} c_{(i,j)}^1 f(\text{Capex, Opex ...}) \cdot x_{i,j}$$

Zielfunktion 2, minimiere:

$$\text{Gesamtexergie } \dot{e}_{\text{ges}} = f_2(x) = \sum_{(i,j)} c_{(i,j)}^2 f(\zeta, \eta \dots) \cdot x_{i,j}$$

Erhaltungsbedingung:

$$\sum_{(i,j)} x_{i,j} - \sum_{(k,i)} x_{k,i} = b_i$$

Kapazitätsbedingung:

$$l_{i,j} \leq x_{i,j} \leq u_{i,j}$$

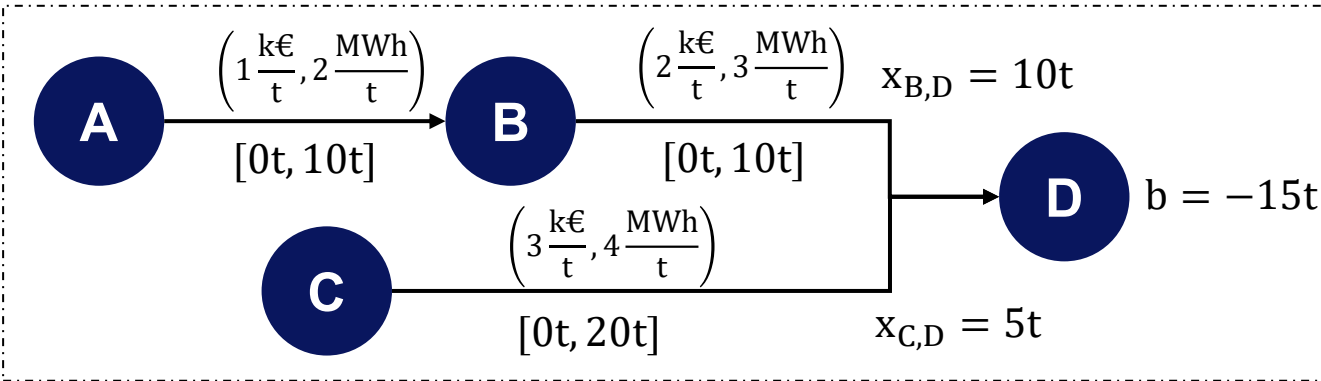
*Summe aller eingehenden Flüsse – Summe aller ausgehenden Flüsse = Bedarf/Produktion in diesem Knoten
b=0 für Transformator-knoten, b < 0 für Senken, b > 0 für Quellen*

Bi-objective network optimization

- Erweitert Netzwerkflussprobleme auf Multi-Objective-Optimierung
- Hinzufügen eines zweiten Parameter-Satzes zu jeder Kante
- Jeder Kante wird nun durch zwei Vektoren dargestellt, einen für Kosten-Intensität (c1) und einen für Exergie-Intensität (c2)
- Variable (x) ist der Materialfluss durch das Netzwerk
- Randbedingungen sind Kapazität (unter, ober) und Erhaltungsgleichung für Exergie und Materialfluss

MODEL OF THE AUSTRIAN INDUSTRY

MATHEMATICAL INTERPRETATION



Zielfunktion 1, minimiere:

$$\text{Gesamtkosten } \dot{c}_{\text{ges}} = f_1(x) = 10t \cdot 1 \frac{k\text{€}}{t} + 10t \cdot 2 \frac{k\text{€}}{t} + 5t \cdot 3 \frac{k\text{€}}{t} = 45k\text{€}$$

Zielfunktion 2, minimiere:

$$\text{Gesamtexergie } \dot{e}_{\text{ges}} = f_2(x) = 10t \cdot 2 \frac{\text{MWh}}{t} + 10t \cdot 3 \frac{\text{MWh}}{t} + 5t \cdot 4 \frac{\text{MWh}}{t} = 70\text{MWh}$$

Erhaltungsbedingung:

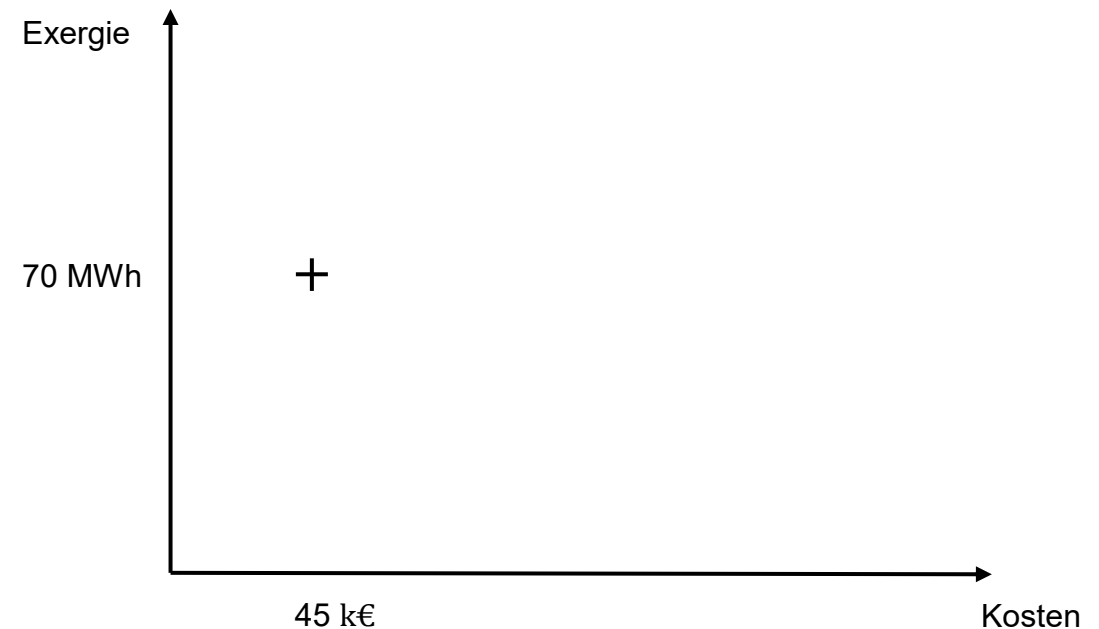
$$\sum_{(i,j)} x_{i,j} - \sum_{(k,i)} x_{k,i} = b_i$$

Kapazitätsbedingung:

$$l_{i,j} \leq x_{i,j} \leq u_{i,j}$$

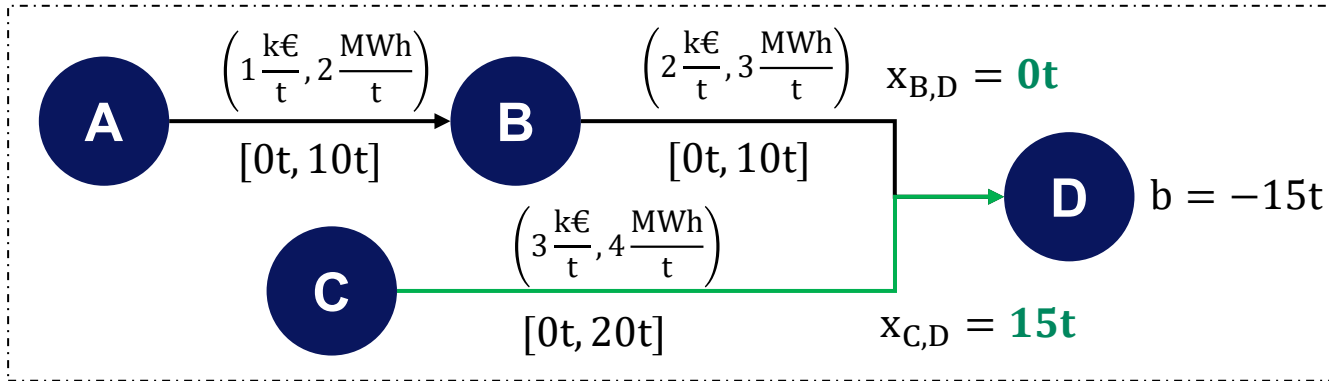
Beispiel 1:

- Bedingungen sind erfüllt
 - Zielfunktionen liefern Ergebnis
 - ist es die optimale Lösung?
- > nein



MODEL OF THE AUSTRIAN INDUSTRY

MATHEMATICAL INTERPRETATION



Zielfunktion 1, minimiere:

$$\text{Gesamtkosten } \dot{c}_{\text{ges}} = f_1(x) = 15\text{t} \cdot 3 \frac{\text{k€}}{\text{t}} = 45 \text{ k€}$$

Zielfunktion 2, minimiere:

$$\text{Gesamtexergie } \dot{e}_{\text{ges}} = f_2(x) = 15\text{t} \cdot 4 \frac{\text{MWh}}{\text{t}} = 60 \text{ MWh}$$

Erhaltungsbedingung:

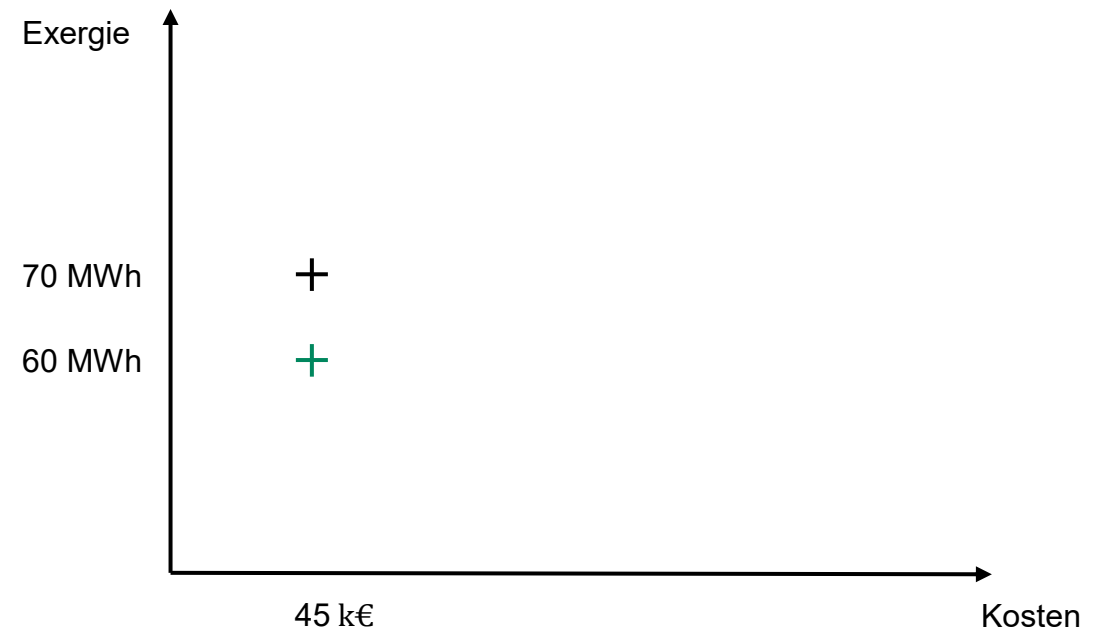
$$\sum_{(i,j)} x_{i,j} - \sum_{(k,i)} x_{k,i} = b_i$$

Kapazitätsbedingung:

$$l_{i,j} \leq x_{i,j} \leq u_{i,j}$$

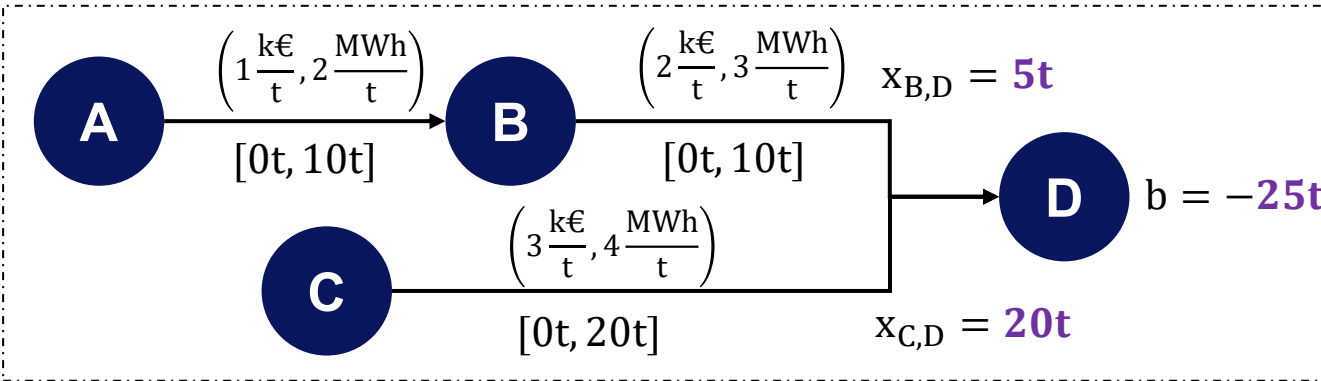
Beispiel 2:

- Bedingungen sind erfüllt
 - Zielfunktionen liefern Ergebnis
 - ist es die optimale Lösung?
- > ja



MODEL OF THE AUSTRIAN INDUSTRY

MATHEMATICAL INTERPRETATION



Zielfunktion 1, minimiere:

$$\text{Gesamtkosten } \dot{c}_{\text{ges}} = f_1(x) = 5t \cdot 1 \frac{\text{k€}}{t} + 5t \cdot 2 \frac{\text{k€}}{t} + 20t \cdot 3 \frac{\text{k€}}{t} = 75 \text{ k€}$$

Zielfunktion 2, minimiere:

$$\text{Gesamtexergie } \dot{e}_{\text{ges}} = f_2(x) = 5t \cdot 2 \frac{\text{MWh}}{t} + 5t \cdot 3 \frac{\text{MWh}}{t} + 20t \cdot 4 \frac{\text{MWh}}{t} = 105 \text{ MWh}$$

Erhaltungsbedingung:

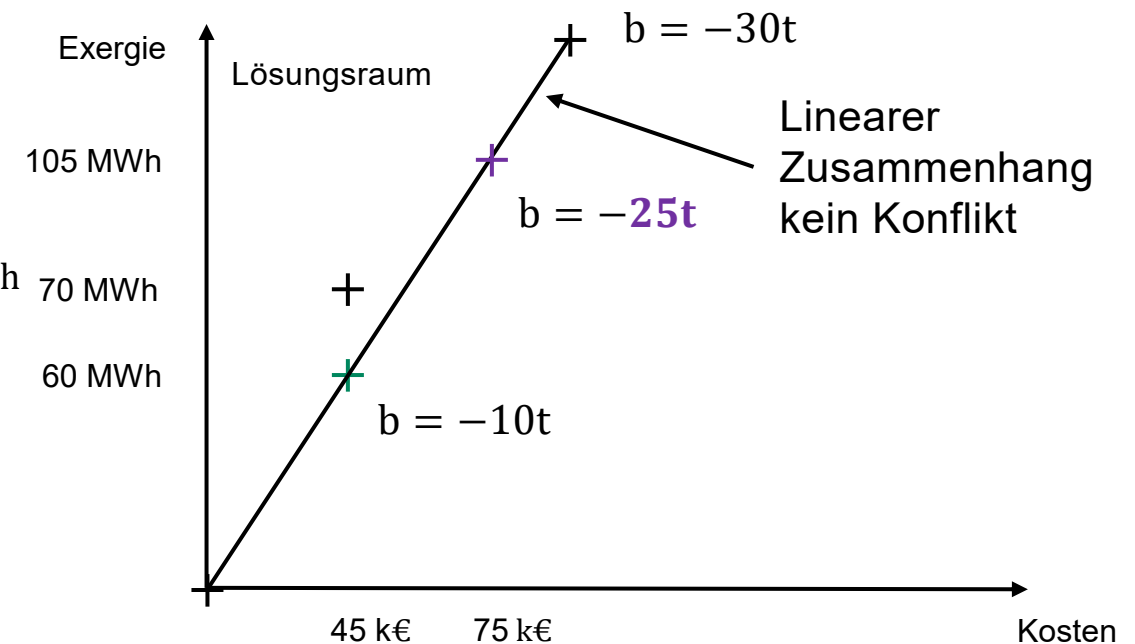
$$\sum_{(i,j)} x_{i,j} - \sum_{(k,i)} x_{k,i} = b_i$$

Kapazitätsbedingung:

$$l_{i,j} \leq x_{i,j} \leq u_{i,j}$$

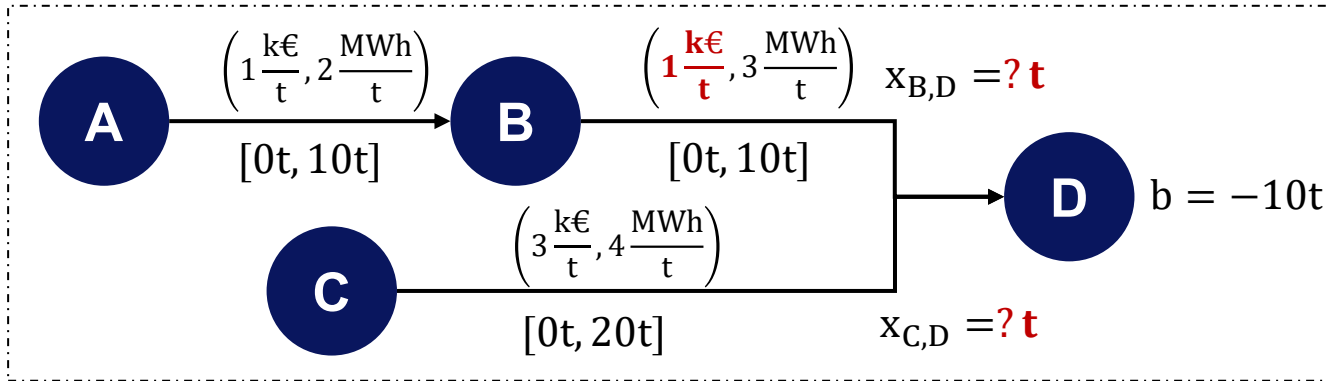
Beispiel 3:

- Bedingungen sind erfüllt
 - Zielfunktionen liefern Ergebnis
 - ist es die optimale Lösung?
- > ja



MODELL DER ÖSTERREICHISCHEN INDUSTRIE

MATHEMATISCHE INTERPRETATION



Beispiel 4:

- Route über ABD zeigt minimale Kosten
- Route über CD zeigt minimalen Exergie Einsatz
- Paretofront = Linie der Kompromisse zwischen diesen beiden

Zielfunktion 1, minimiere:

$$\text{Gesamtkosten } \dot{c}_{\text{ges,ABD}} = f_1(x) = 10t \cdot 1 \frac{\text{k€}}{t} + 10t \cdot 1 \frac{\text{k€}}{t} = \mathbf{20 \text{ k€}}$$

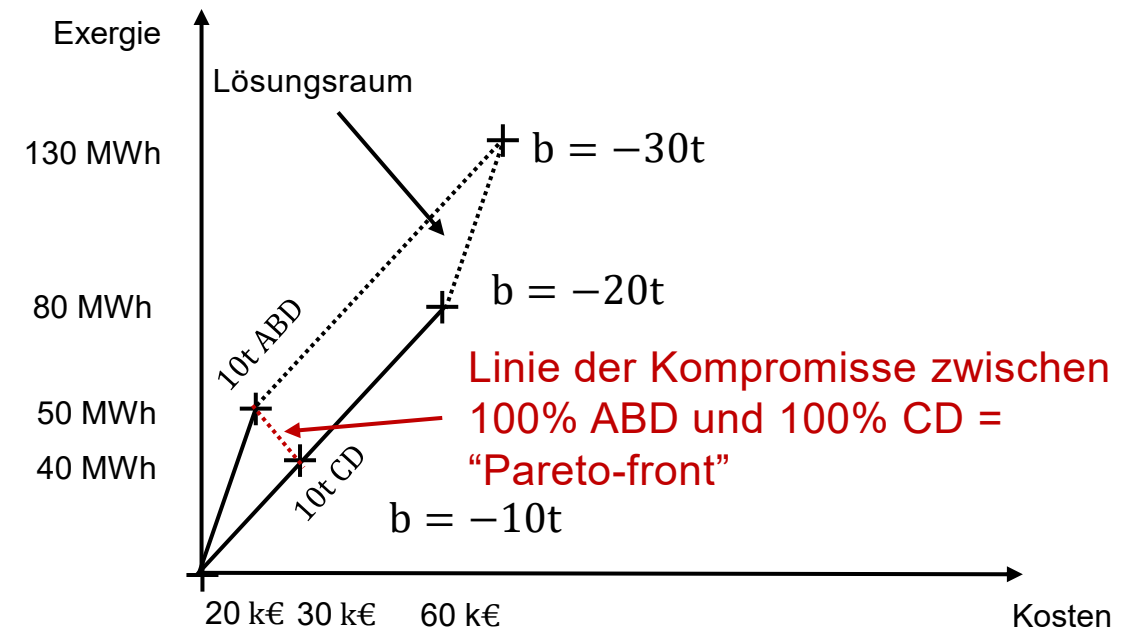
$$\text{Gesamtkosten } \dot{c}_{\text{ges,CD}} = f_1(x) = 10t \cdot 3 \frac{\text{k€}}{t} = 30 \text{ k€}$$

Konflikt zwischen den Zielfunktionen

Zielfunktion 2, minimiere:

$$\text{Gesamtexergie } \dot{e}_{\text{ges,ABD}} = f_2(x) = 10t \cdot 2 \frac{\text{MWh}}{t} + 10t \cdot 3 \frac{\text{MWh}}{t} = 50 \text{ MWh}$$

$$\text{Gesamtexergie } \dot{e}_{\text{ges,CD}} = f_2(x) = 10t \cdot 4 \frac{\text{MWh}}{t} = \mathbf{40 \text{ MWh}}$$



OPTIMIERUNGS PROBLEM

LÖSUNGSWEGE FÜR DIE OPTIMIERUNG VON BI-OBJECTIVE NETWORKS

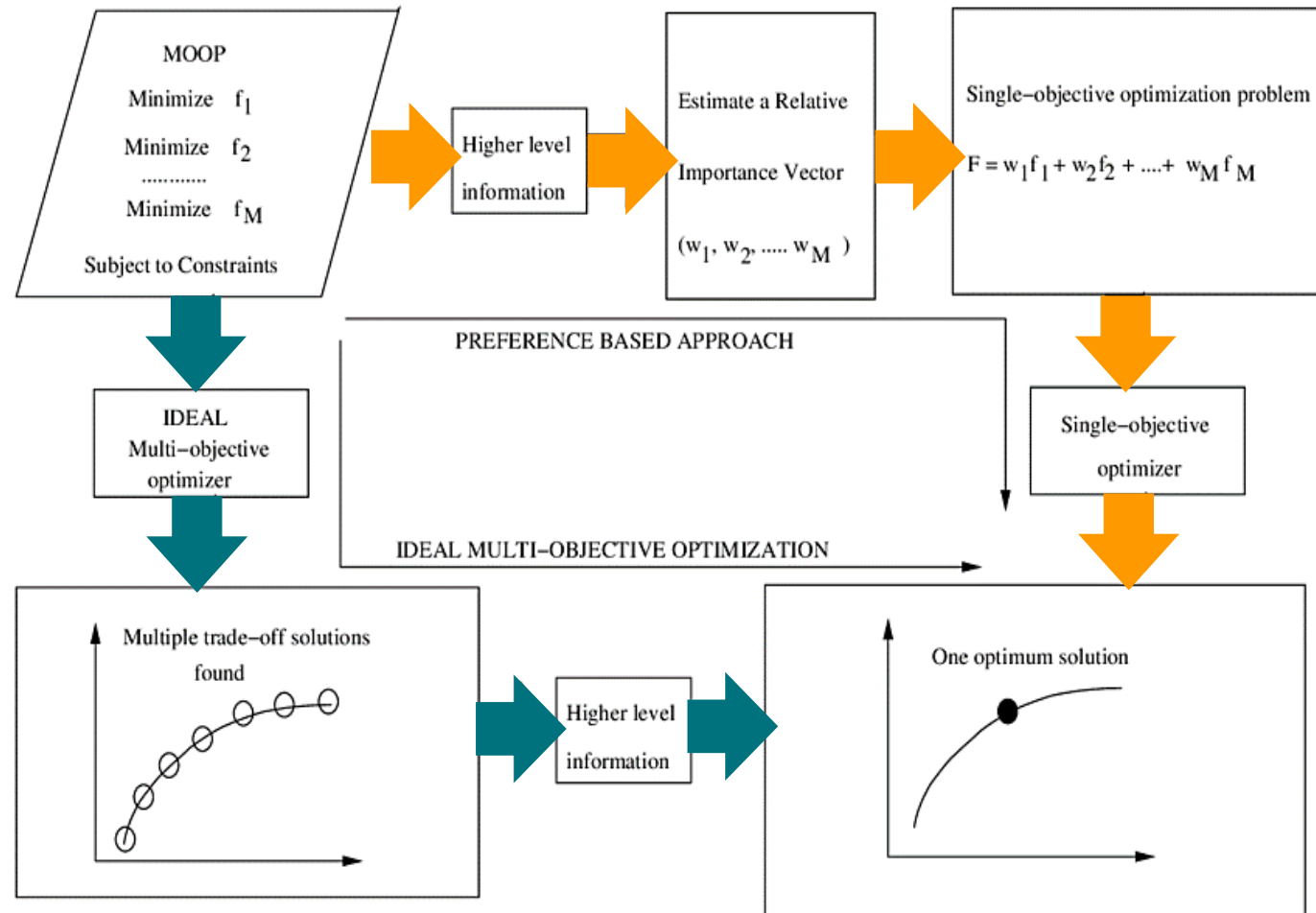
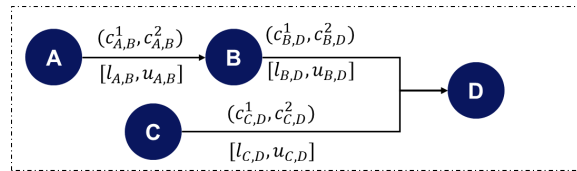
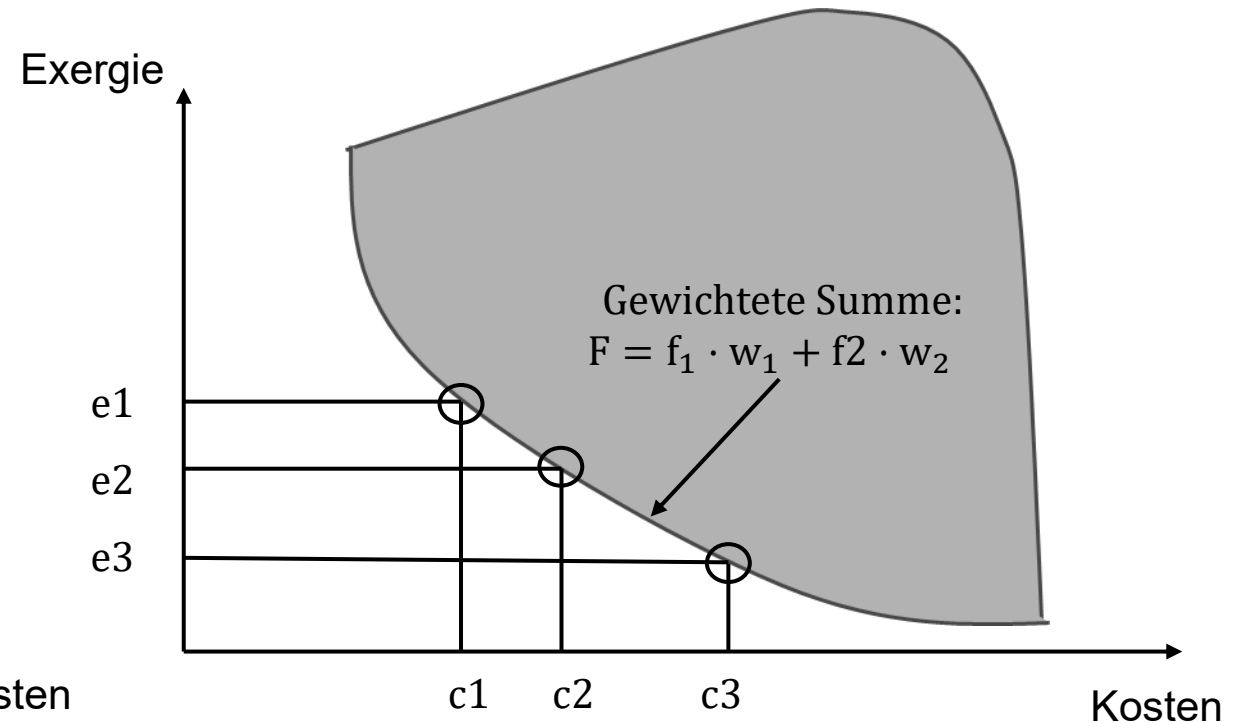


Abbildung2: Two approaches to multi-objective optimization, (Khare, Vineet & Yao, Prof & Deb, Kalyanmoy. (2003). Performance Scaling of Multi-Objective Evolutionary Algorithms) https://www.researchgate.net/publication/2829186_Performance_Scaling_of_Multi-Objective_Evolutionary_Algorithms

OPTIMIERUNGS PROBLEM

GESTALT DER PARETOFRONT

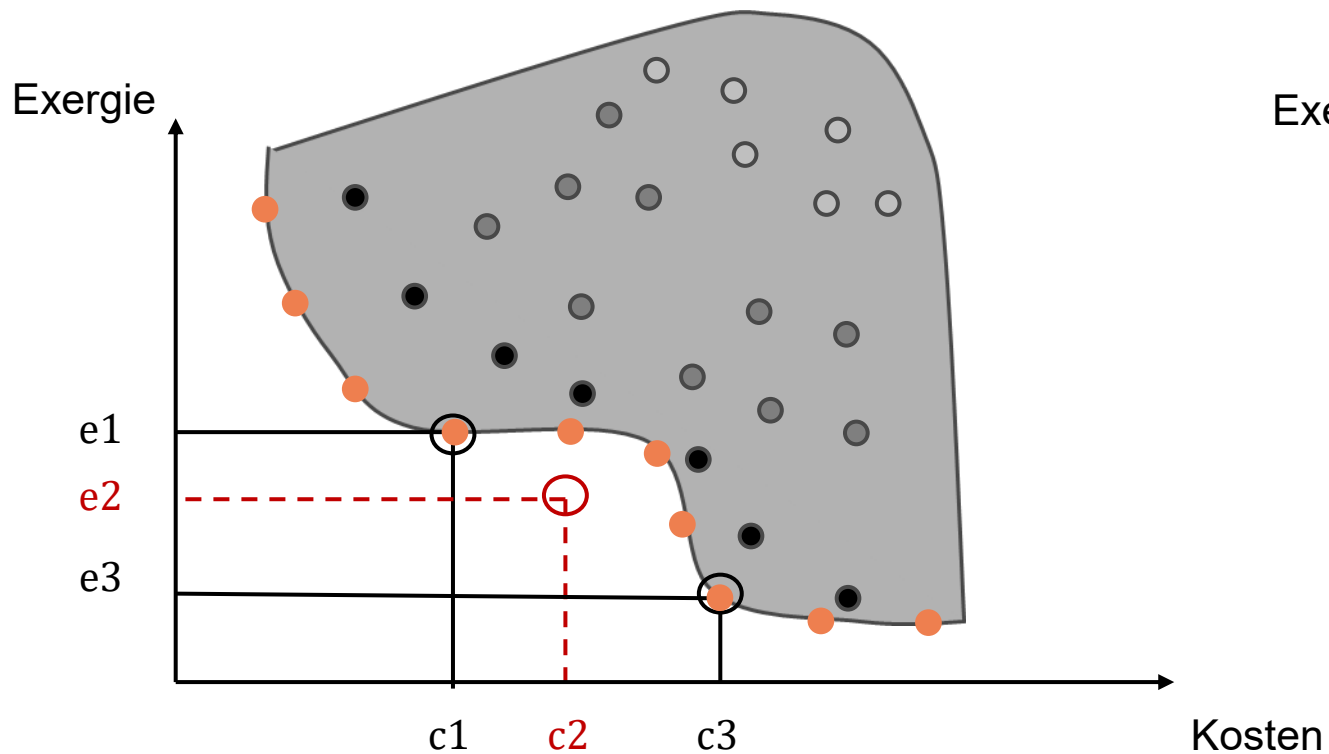
Konvexe Paretofront
Single Objective Solvers



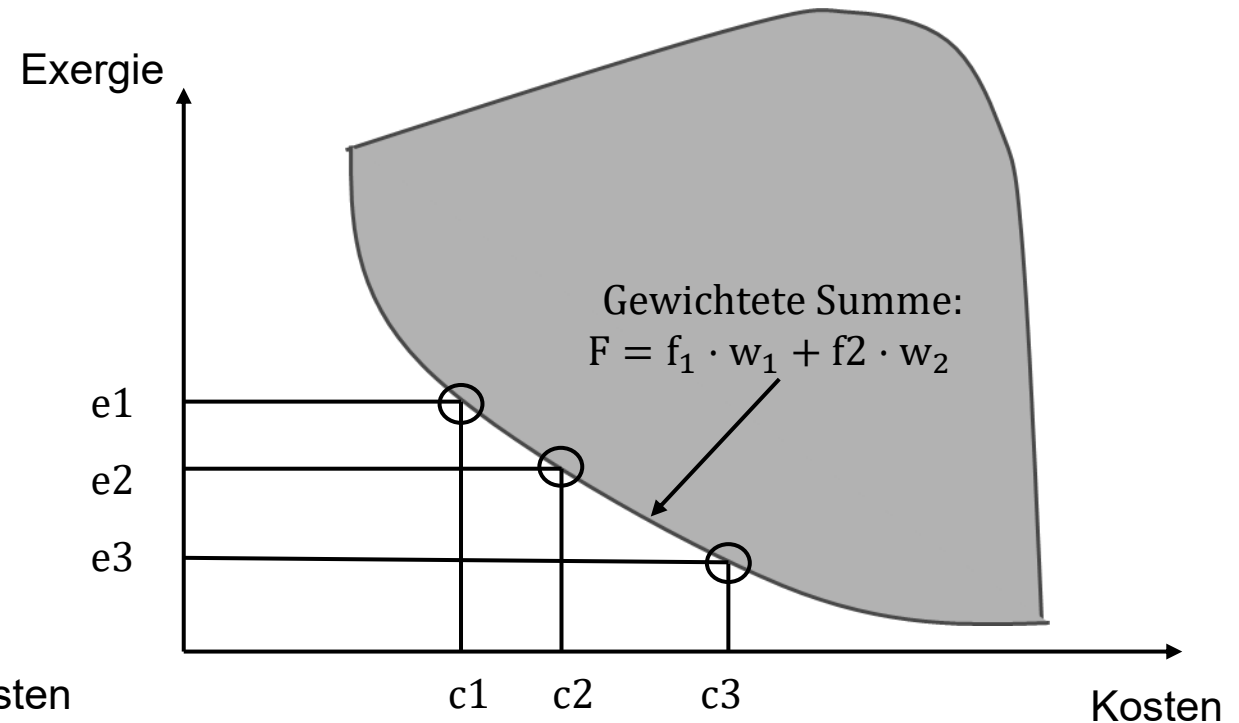
OPTIMIERUNGS PROBLEM

GESTALT DER PARETOFRONT

**Nicht Konvexe Paretofront
Multi Objective Solvers**



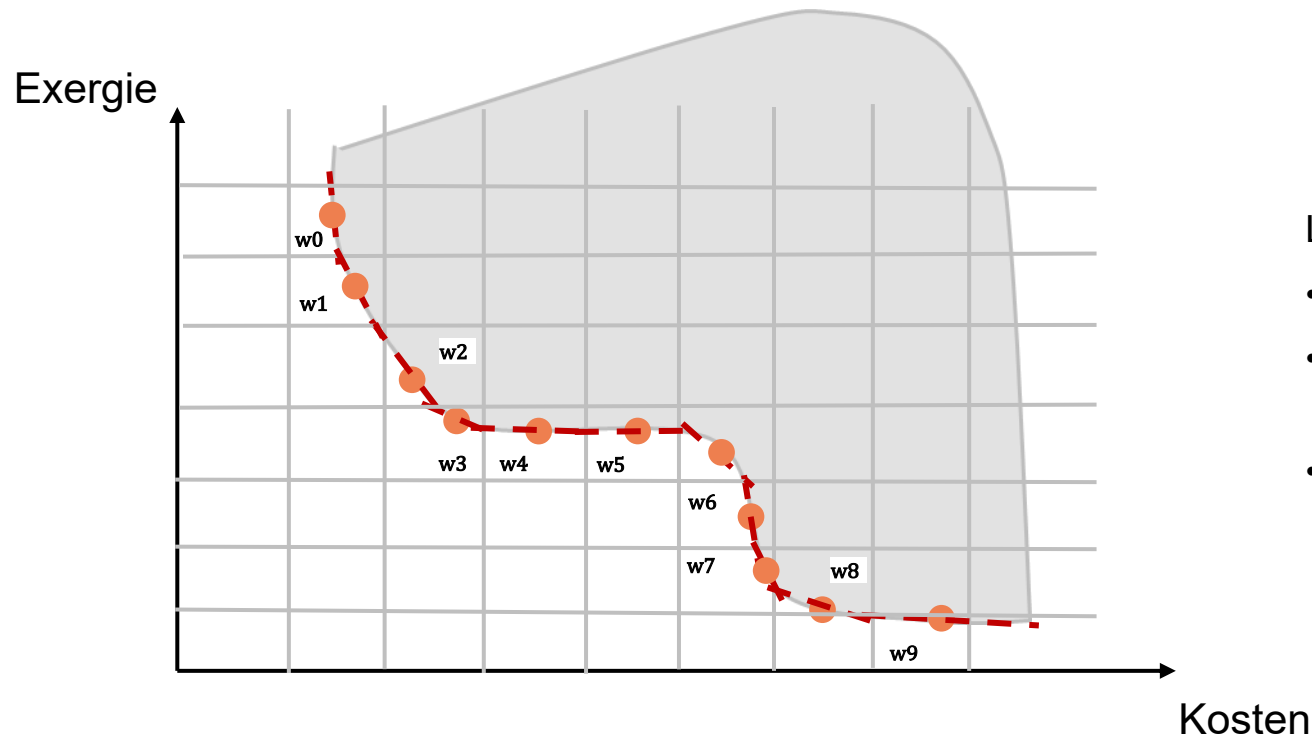
**Konvexe Paretofront
Single Objective Solvers**



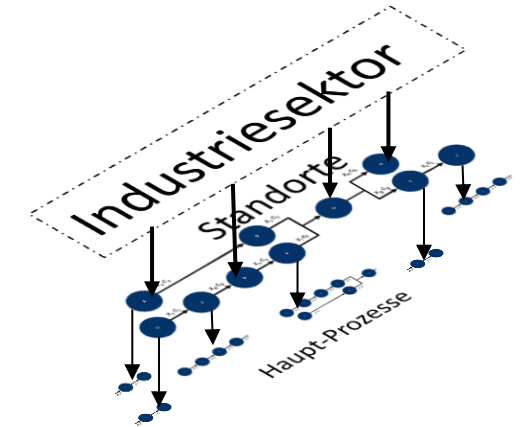
OPTIMIERUNGS PROBLEM

LÖSEN NICHT KONVEXER PARETOFRONTEN MIT SINGLE OBJECTIVE LÖSERN

Nicht Konvexe Paretofront
Single Objective Solvers



$$f_{local} = f_{process_1} \cdot w_1 + f_{process_2} \cdot w_2 + \dots + f_{process_n} \cdot w_n$$

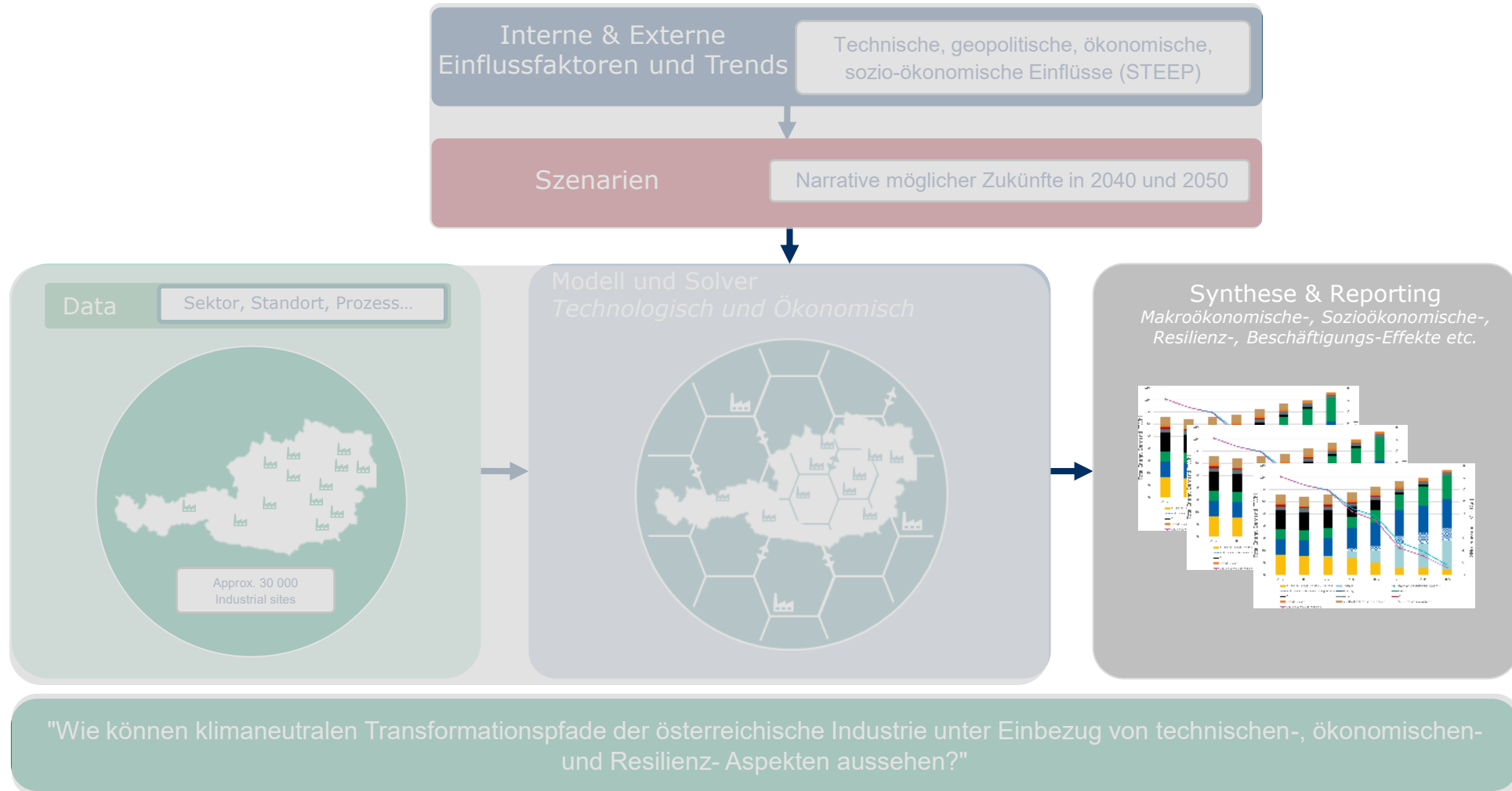


Lösungsansatz:

- „Slicing“ oder "Epsilon-Methode"
- Die gesamte Front durch Randbedingungen in kleinere Abschnitte aufteilen
- Die Bedingung kann ein Share- oder Kapazitätsgrenze [l,u] sein und beeinflusst (x)

METHODIK ÜBERBLICK

ADRESSIEREN DER HAUPTFORSCHUNGSFRAGE



ERGEBNISSYNTHESE

ABLEITEN VON HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

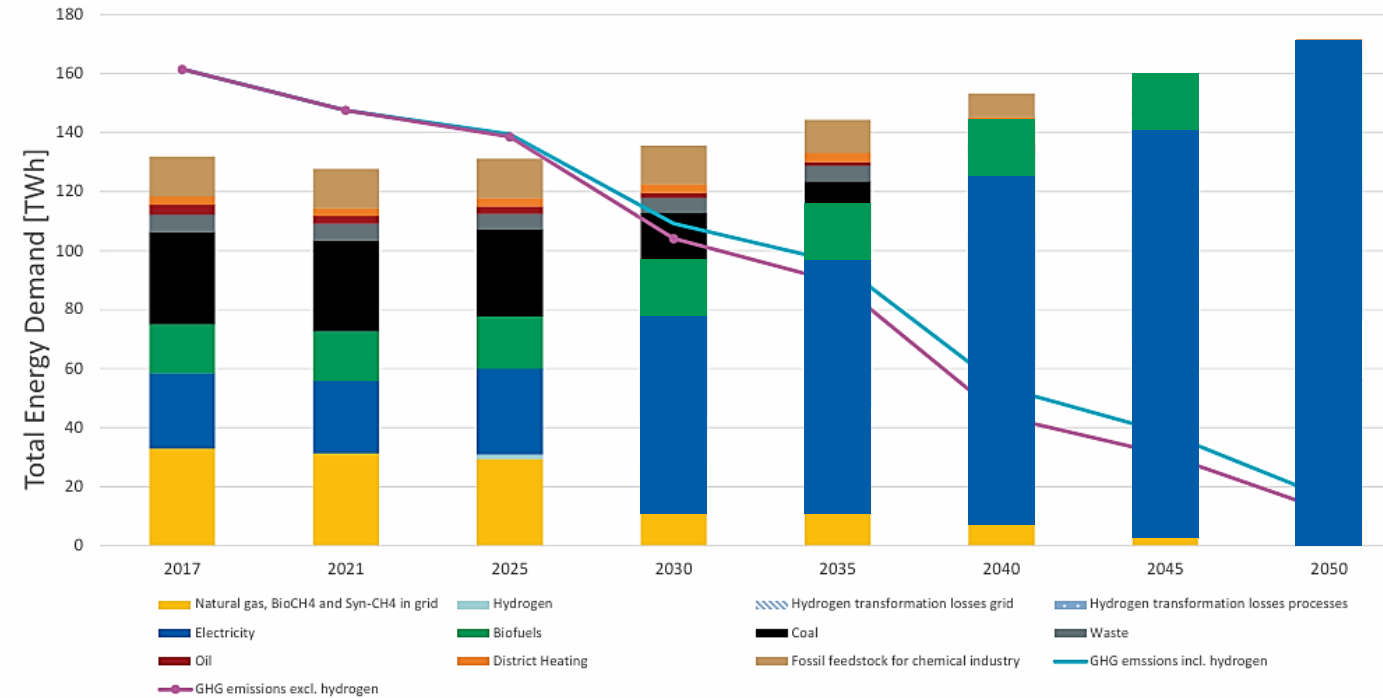
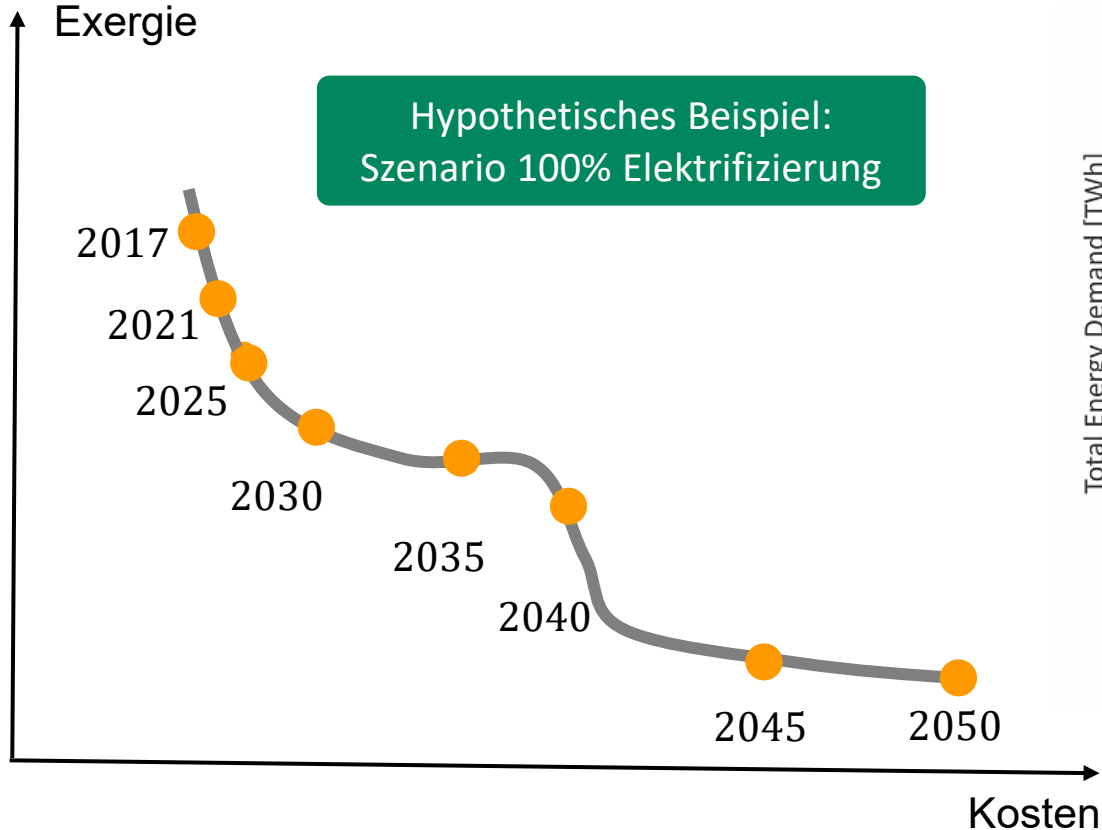


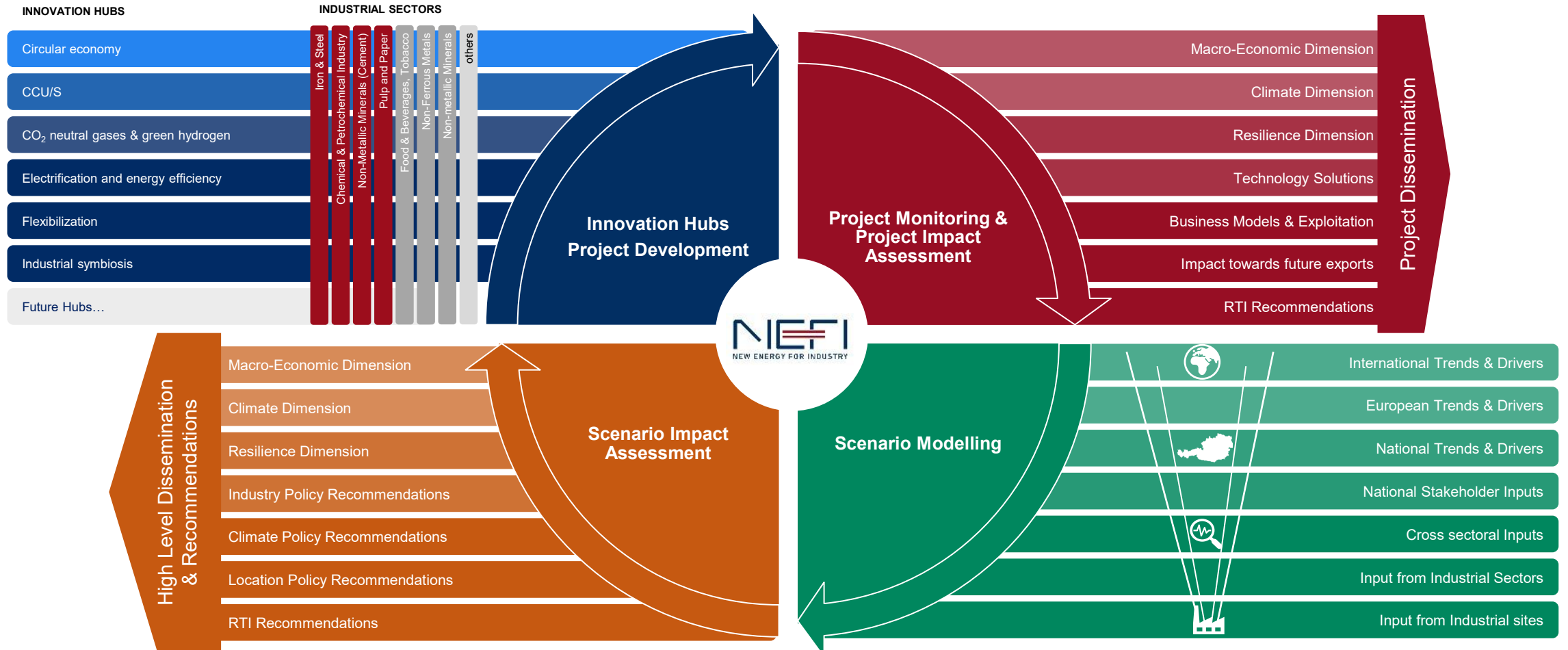
Abbildung4: Gesamtenergiebedarf und Treibhausgasemissionen der österreichischen Industrie im Szenario ZEM „Pathway to Industrial Decarbonisation – Scenarios for the Development of the Industrial Sector in Austria“. NEFI, Nov. 2022. doi: 10.5281/zenodo.14130568.

Fortschritt in der Elektrifizierung

Diese Informationen werden genutzt, um die Infrastrukturbedarfe, Makroökonomische Auswirkungen und Handlungsfelder abzuleiten

SZENARIO MODELLIERUNG IM NEFI INNOVATIONSNETZWERK

INNOVATIONS PROZESS



METHODIK ÜBERBLICK

Fragen ?

