

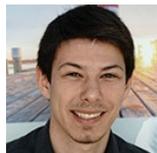
Nachhaltige Energieversorgung durch vernetzte Systembewertung – Konzept und erste Ergebnisse des Josef Ressel-Zentrums LiSA

Eva-Maria Wiener

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Burgenland

Department Energie & Umwelt

Josef Ressel Zentrum für vernetzte Systembewertung einer nachhaltigen Energieversorgung (LiSA)



**Florian Schittl
(Researcher)**

Energy Process Engineering
Process simulation



**Martin Ofner
(Researcher)**

Energy Process Engineering
Process simulation



**Doris Rixrath
(Key Researcher,
Centre Head)**

Holistic assessment
Life cycle assessment



**Lukas Gnam
(Key Researcher,
University Lecturer)**

Mathematical modelling
High Performance Computing



**Eva-Maria Wiener
(Researcher)**

Life cycle assessment
Environmental analytics



**Jürgen Krail
(Key- Researcher,
University lecturer)**

Energy Process Engineering
Process simulation



**Christian Pfeiffer
(Key Researcher)**

Quantitative data analysis
Statistical modelling
Predictive analytics and sample design



**Fulbright
visiting scholars**



**Richard Krottil
(Key Researcher,
Programme Head)**

Energy Process Engineering
Process simulation



**Gerhard Piringer
(Key Researcher,
University lecturer)**

Life cycle assessment
Holistic assessment



**Barbara Tölly
(Researcher)**

Life cycle assessment
Environmental analytics



**Raphael Schauer
(Researcher)**

Life cycle assessment
Environmental analytics



**Markus Puchegger
(Key Researcher)**

Business model development
Energy industry
System integration



**Support from
Master students**

Nachhaltigkeit...?!

NACHHALTIGKEIT

Ökologisch



Sicherung der natürlichen Lebensgrundlagen, Schutz von Ökosystemen, Ressourcen- und Klimaschutz.
zentrale Frage: Wie können natürliche Systeme langfristig stabil bleiben?
(Kommission WCED, 1987; Rockström et al., 2009)

Ökonomisch



Entwicklung von Wirtschaftssystemen, die langfristig tragfähig sind, ohne ökologische oder soziale Grundlagen zu gefährden.
zentrale Frage: Wie kann Wertschöpfung langfristig gesichert werden?
(OECD, 2001; International Organization for Standardization [ISO], 2015)

Sozial



Soziale Gerechtigkeit, Bildung, Partizipation, Bekämpfung von Armut und Ungleichheit.
zentrale Frage: Wie kann gesellschaftlicher Zusammenhalt gefördert werden?
(Vereinte Nationen, 2015; ISO, 2010)

Nachhaltige Energieversorgung...?!



Bildquelle: DALL·E / ChatGPT, OpenAI (2025)



Versorgt rund **2 Millionen Menschen** (~22 % der österreichischen Bevölkerung) mit **Strom, Gas, Wärme und Kälte**
Ca. **2.200 Mitarbeiter:innen**
Fernwärmeversorgung für **440.000 Haushalte** (~10 % der österreichischen Haushalte)



Versorgt rund **209.000 Menschen mit Strom** und **43.000 Menschen mit Gas** (~2,3 % bzw. ~0,5 % der österreichischen Bevölkerung)
Ca. **900 Mitarbeiter:innen**
Größter Windstromproduzent Österreichs
→ rund **3 TWh/Jahr**, das entspricht **177 % des Stromverbrauchs im Burgenland**

Die Idee

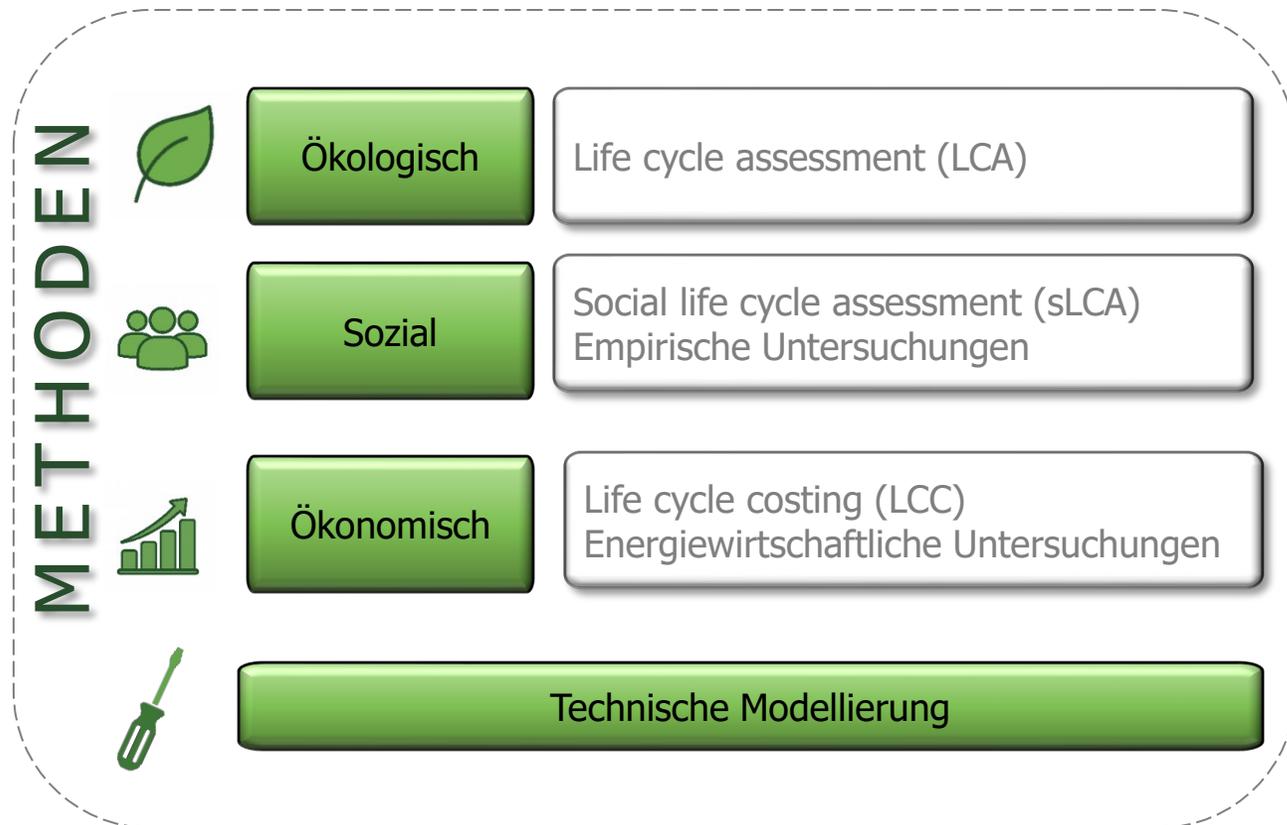
Wir wollen Nachhaltigkeit nicht nur diskutieren, sondern so aufbereiten, dass sie sich auch **bewerten und vergleichen** lässt.

Ziel ist es, fundierte Grundlagen für reale Entscheidungen zu schaffen.

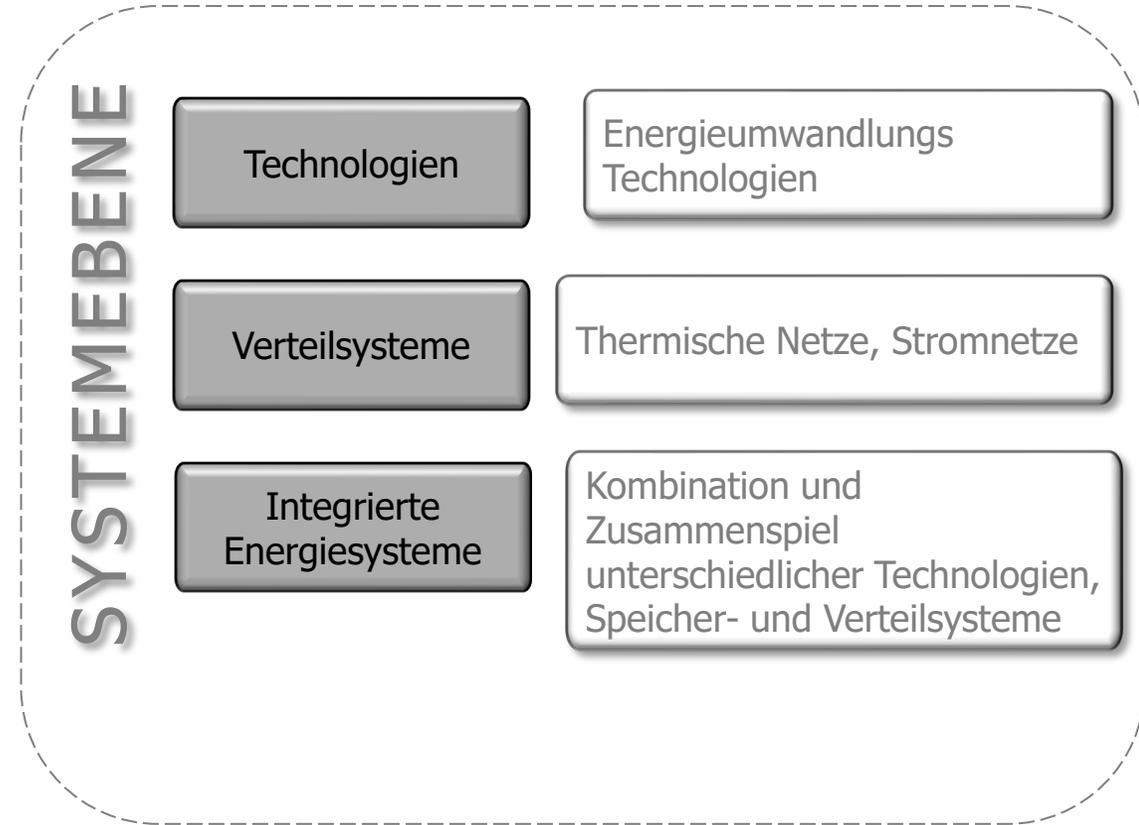


Der Weg

1. Geeignete Bewertungsmethoden finden:



2. Geeignete Anwendungsfälle aus der Praxis definieren:



LCSA

Zentrale Frage: Wie können ökologische, ökonomische und soziale Auswirkungen systematisch im Lebenszyklus betrachtet werden?

Drei Bewertungsmethoden bilden die sogenannte „**Triple Bottom Line**“ der Nachhaltigkeitsbewertung und werden im Rahmen des **Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA)** zusammengeführt.

(Klöpffer, 2008; Guinée et al., 2011; Zamagni et al., 2016; Neugebauer, 2016).

Dabei werden drei Dimensionen idealerweise mit denselben Systemgrenzen kombiniert:

$$\text{LCSA} = \text{LCA} + \text{LCC} + \text{SLCA}$$

Drei Bewertungsmethoden:

- Life Cycle Assessment (LCA) – Ökobilanz
- Life Cycle Costing (LCC) – Lebenszykluskostenrechnung
- Social Life Cycle Assessment (SLCA) – Soziale Lebenszyklusanalyse



Abbildung: „Cradle-to-grave“ Lebensweg

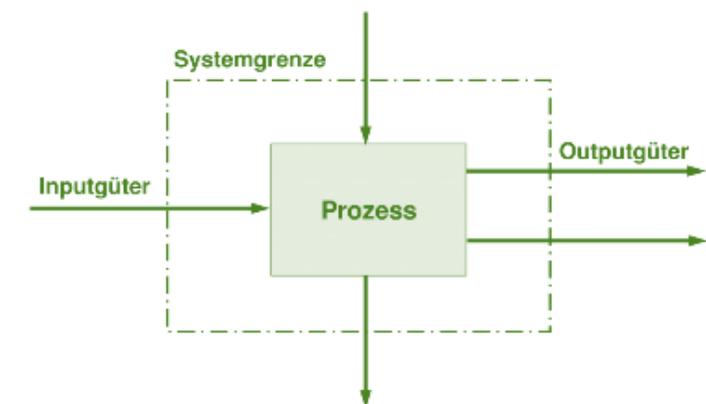
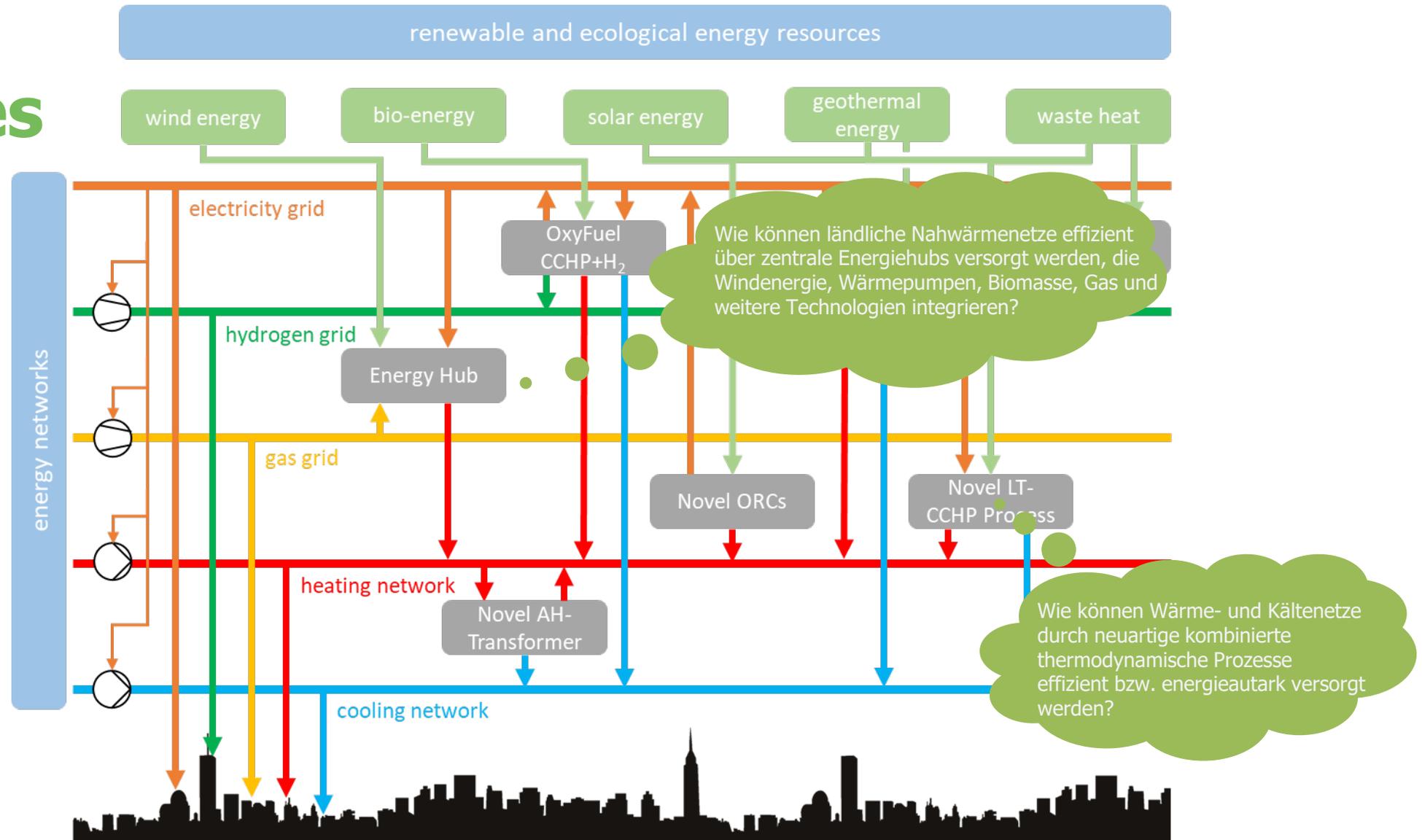


Abbildung: Systemgrenzen

Test Cases



Methodenanwendung: Energy Hub Neusiedl



Technische Bewertung:

- Weiterentwicklung des grundlegenden technischen Simulationsmodells
- Bewertung zweier Optionen zur Effizienzsteigerung



Ökologische Bewertung:

- Basismodell in der LCA-Software openLCA ist in Kürze einsatzbereit zur Berechnung erster Ergebnisse



Soziale Bewertung:

- Lieferkettenanalyse unter Verwendung der SOCA-Datenbank
- Berücksichtigung von Stakeholder-Beteiligung sowie sozialen Fragestellungen im Zusammenhang mit Energieverbrauch und -bereitstellung



Ökonomische Bewertung:

- Erste Ergebnisse der Lebenszykluskostenanalyse (LCC) für das System liegen vor
- Techno-ökonomische Bewertung

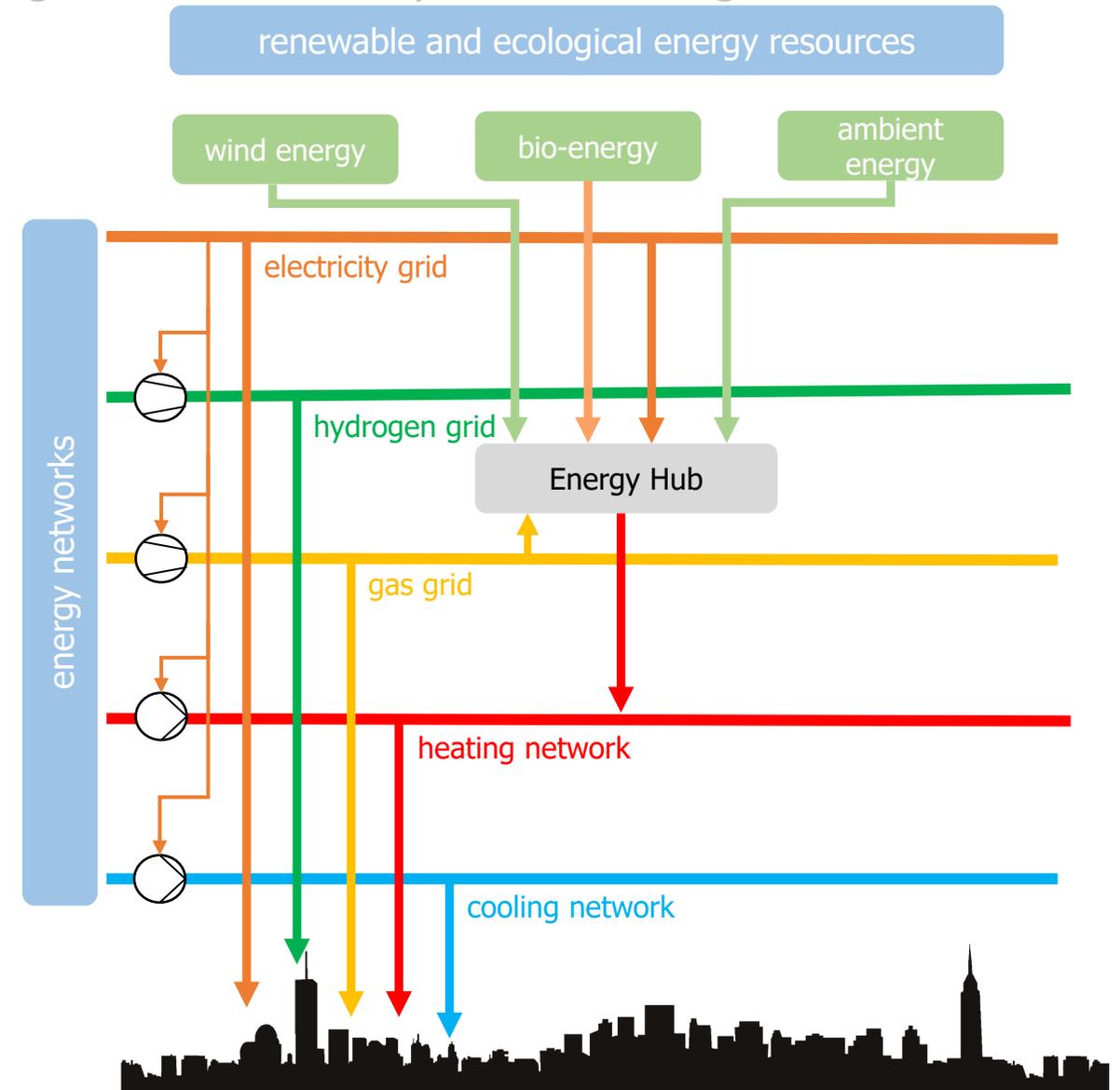


Abbildung: Erneuerbarer Energie-Hub mit Anbindung an das Nahwärmenetz in Neusiedl



Technische Modellierung - Methodenentwicklung

Technologie-Screening

Zielsetzung:

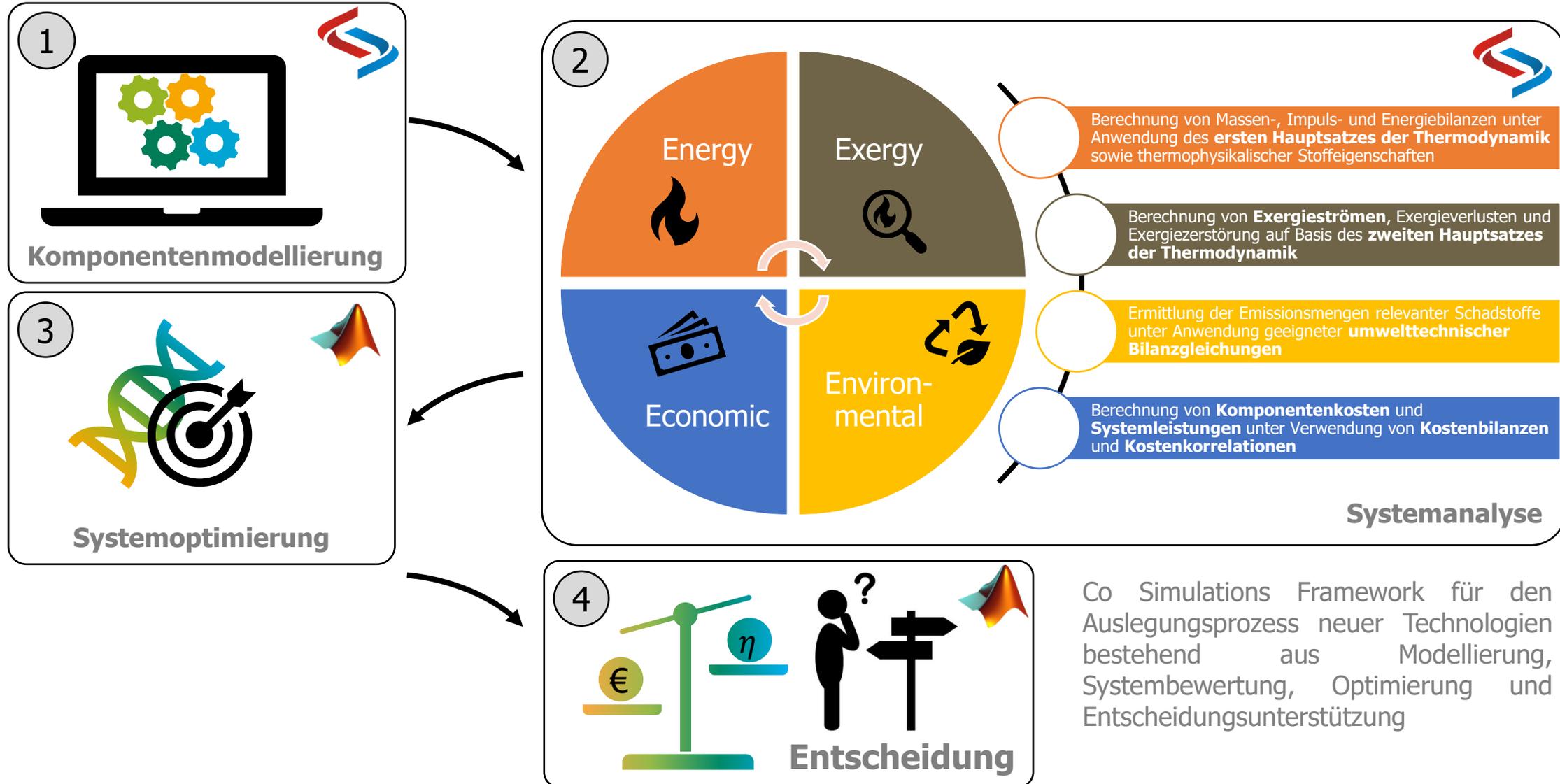
- Überprüfung der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit neuer Technologien
- Identifikation geeigneter Anwendungsbereiche
- Unterstützung eines optimalen Auslegungsprozesses

Betriebsoptimierung

Zielsetzung:

- Dynamische Optimierung bestehender hybrider Energiesysteme und Netze
- Entwicklung von Strategien für einen kosten- und umweltfreundlichen Betrieb

Technologie-Screening: Simulations-Framework



Betriebsoptimierung: Simulations Framework

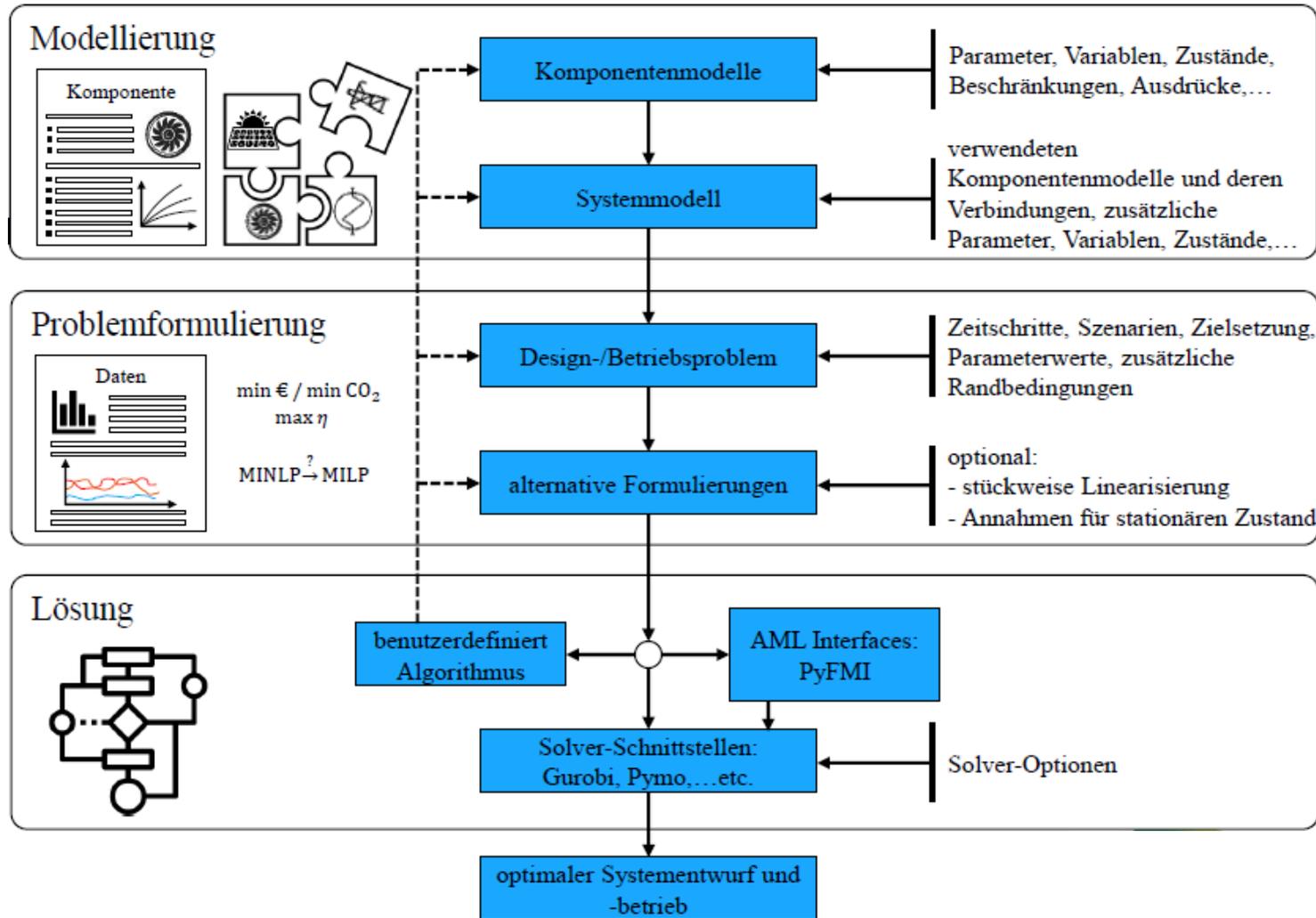


Abbildung: Co-Simulations Framework für den optimalen Betrieb bestehender Energiesysteme bestehend aus Modellierung, Problemformulierung und Lösung durch dynamischer Optimierung



Technische Modellierung – Test Case

Der Energie-Hub in Neusiedl umfasst:

- Konventionelle Wärmeerzeuger (Biomasse- und Gaskessel)
- Zwei in Reihe geschaltete Wärmepumpenkaskaden (Luft-Wasser, Wasser-Wasser)
- Warmwasserspeicher
- Direkte Stromanbindung an einen nahegelegenen Windpark

Zur Effizienzsteigerung wurden zwei Systemerweiterungen mithilfe von IPSEpro v8.0 simuliert:

- Ein passives Abgas-Kondensationssystem (zusätzlicher Wärmeübertrager)
- Ein aktives Abgas-Kondensationssystem (Wärmeübertrager in Kombination mit einer Wärmepumpenkaskade)

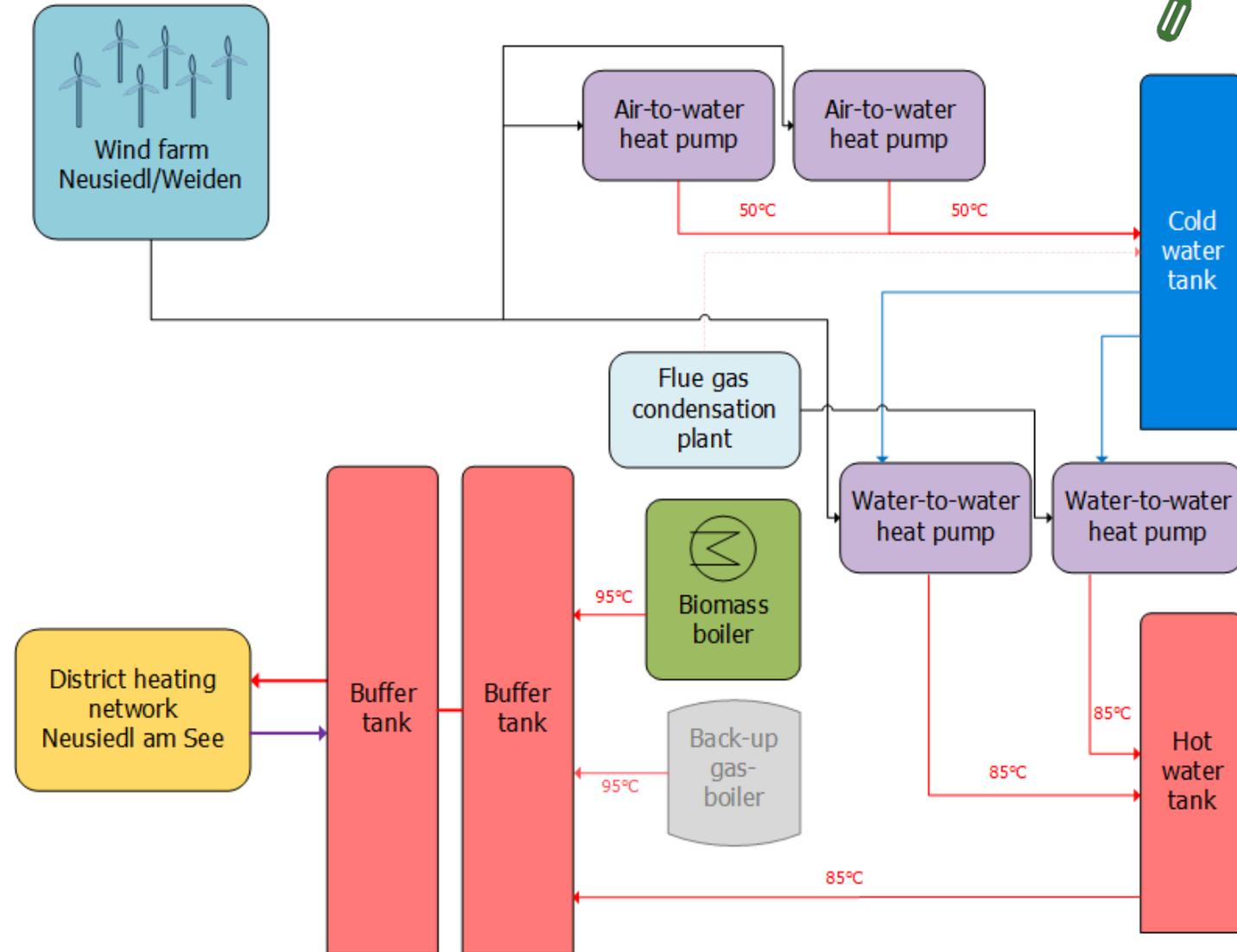
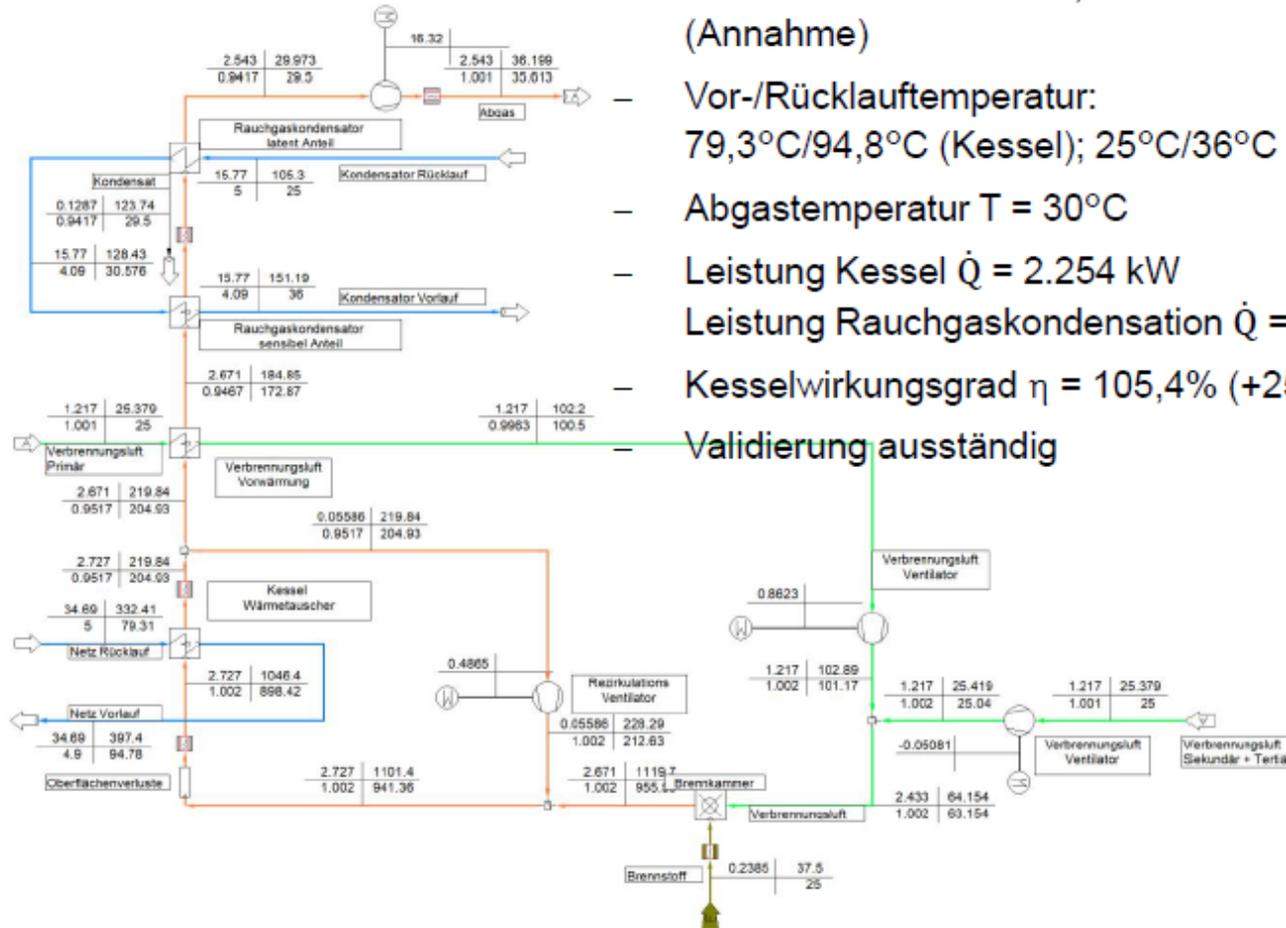


Abbildung: Technisches Modell Energie-Hub mit Anbindung an das Nahwärmenetz in Neusiedl

Technische Modellierung – Test Case – Effizienzsteigerung



- Modellierung Heizwerk Neusiedl - passive Rauchgaskondensation
- Kessel wie Basismodell, zusätzlicher Wärmeabnehmer auf Niedertemperaturniveau (Annahme)
- Vor-/Rücklauftemperatur: 79,3°C/94,8°C (Kessel); 25°C/36°C (Rauchgaskondensation)
- Abgastemperatur T = 30°C
- Leistung Kessel $\dot{Q} = 2.254 \text{ kW}$
- Leistung Rauchgaskondensation $\dot{Q} = 724 \text{ kW}$ (359 kW sensibel, 365 kW latent)
- Kesselwirkungsgrad $\eta = 105,4\%$ (+25,6 % Vergleich zu Basismodell)
- Validierung ausständig



Brennstoffzusammensetzung		
	[Mass % wb]	[Mass % db]
C [%]	33.72	48.88
H [%]	4.42	6.40
N [%]	0.15	0.22
O [%]	30.49	44.20
S [%]	0.00	0.00
H2O [%]	31.01	-
Asche [%]	0.21	0.30
Summe [%]	100.00	100.00
Heizwert [kJ/kg]		11851.5

Energiebilanz	
Primärenergie [kW]	2526.3
Nutzenergie Kondensator (latent) [kW]	364.8
Nutzenergie Kondensator (sensibel) [kW]	358.7
Nutzenergie Kondensator (Gesamt) [kW]	723.5
Nutzenergie Kessel Wärmetauscher [kW]	2254.1
Nutzenergie [kW]	2977.6
Taupunkttemperatur [°C]	47.8
Adiabate Brennraumtemperatur [°C]	955.5
Wirkungsgrad [%]	105.4
Lambda [-]	2.5

Abwärme (bez. auf 25°C) [kW]	25.0
Abwärme (bez. auf 25°C) [MJ/MJ/WärmeOutput]	0.008

Massenbilanz			
	[kg/s]	[m³/h]	[kg/MJ/WärmeOutput]
Brennstoff	0.238		0.0801
Verbrennungsluft	2.433	7541.6	0.8173
Abgas	2.543	7981.3	0.8539
Kondensat	0.129		0.0432

Baugruppe	Bezeichnung in Messstellenliste	Messdaten	Simulation	Anmerkung
Wärmetauscher	Leistung Biokessel [kW]	2254.14	2254.14	Set Value
Wärmetauscher	Vorlauf Biomassekessel Wärmezahl [°C]	94.78	94.78	Set Value
Wärmetauscher	Rücklauf Biomassekessel 1 Wärmezahl [°C]	79.31	79.31	Set Value
Wärmetauscher	Durchfluss Biokessel 1 [m³/h]	128.58	128.42	Messung im Rücklauf
Verbrennungsluft	Luxo Temperatur Primärluftventilatoren [°C]	100.5	100.50	Set Value
Brennkammer	Feuertemperatur [°C]	941.36	941.36	Set Value; Mittelwert aus 2 gemessenen Werten
Brennkammer	CO2 Gehalt [%]	11.08	11.08	Set Value; Messung vor Kondensator im feuchten Abgas
Brennkammer	Unterdruck Feuerbox [mbar]	0.40	0.40	Set Value
Abgas	Rauchgastemperatur [°C]	172.87	172.87	Set Value
Brennstoff	Wassergehalt [%]	31.01	31.01	Set Value

Rauchgaskondensator Typ Heger HEGC-0300 (Rauchgaskondensator nach 3MW Kessel bei Hackgut M45)			
Rauchgaskondensator	Wert Simulation	Wert Spezifikation	Anmerkung
Druckverlust Rauchgas [bar]	0.00485	0.00495	
Druckverlust Netz [bar]	0.91	0.81	
Temperatur Netz Eintritt [°C]	25.00	25	
Temperatur Netz Austritt [°C]	36.00	36	
Temperatur Abgas Austritt [°C]	29.50	29.5	
Abgasfeuchte Austritt [Mass % wb]	2.68	2.53	
Thermische Leistung [kW]	723.48	955	955 kW nach 3 MW Kessel
Netzseitiger Durchsatz [m³/h]	58.92	75	

	nach Feuerung		nach Feuerung		nach Feuerung		nach Feuerung		nach Kessel		nach Kessel		nach Kessel		nach Kessel		nach Kessel	
	[Vol % wb]	[Vol % db]	[Mass % wb]	[Mass % db]	[Vol % wb]	[Vol % db]	[Mass % wb]	[Mass % db]	[Vol % wb]	[Vol % db]	[Mass % wb]	[Mass % db]	[kgBr./t]	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[kg/MJ/WärmeOutput]	
N2 [%]	69.25	78.41	67.89	73.40	74.97	78.41	71.4301	73.4004	7.6162	1.8163	0.6100	0.0990						
CO2 [%]	7.15	8.10	11.03	11.91	7.74	8.10	11.5887	11.9084	1.2358	0.2947	0.0000	0.0000						
O2 [%]	11.08	12.52	12.40	13.39	11.97	12.52	13.0315	13.3910	1.3895	0.3314	0.1113	0.0229						
H2O [%]	11.68	-	7.37	-	4.38	-	2.8644	-	0.2862	0.0583	0.0229	0.0000						
CO [%]	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000						
CH4 [%]	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000						
C2H6 [%]	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000						
C3H8 [%]	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000						
H2 [%]	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000						
H2S [%]	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000						
SO2 [%]	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000						
AR [%]	0.88	0.97	1.20	1.30	0.93	0.97	1.2653	1.3002	0.1348	0.0322	0.0108	0.0000						
Total	100.00	100.00			100.00	100.00												

Randbedingungen Fernheizwerk Neusiedl:
 Rauchgaskondensator:
 Daten der Spezifikation für exakte Modellierung unzureichend.
 Spezifikation bezieht sich auf 3MW Anlage, ausgeführte Anlage mit geringerer Leistung.
 Exaktere Modellierung erst auf Basis von Messwerten (Temperaturen am Kondensator) möglich.



Ökologische Bewertung - Methodenentwicklung



Zeitlich aufgelöste Modelle von Strom- und Wärmemixen zur realitätsnäheren Abbildung der Versorgungssituation:

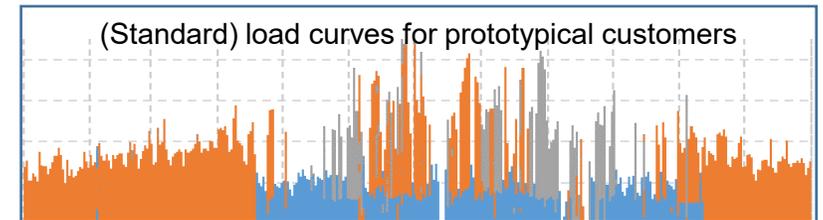
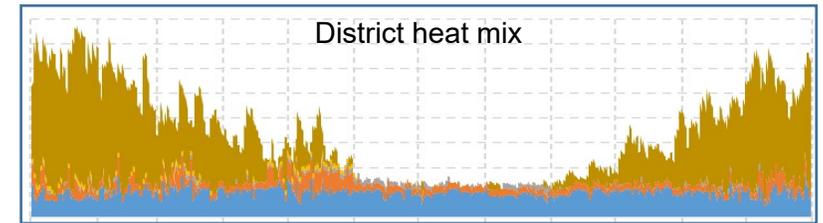
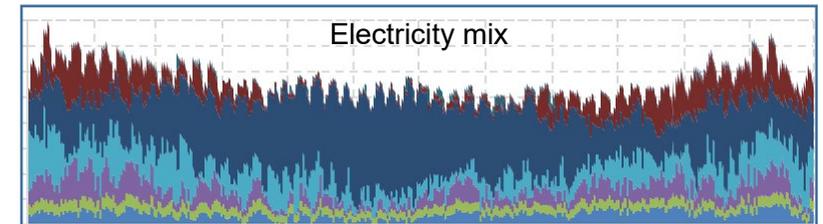
- Weiterentwicklung standardisierter Lastprofile
- Umsetzung von **konsequentialer Modellierung** (abhängig von der Identifikation der **marginalen Strom- und Wärmeversorger**)

Weiterentwicklung methodischer Ansätze:

- Erarbeitung robuster **Regeln zur Festlegung von Systemgrenzen**
- Durchführung **globaler Sensitivitätsanalysen** als Grundlage für Skalierung und Parametrisierung vereinfachter Modelle
- **Integration der Umweltbewertung** bzw. deren Ergebnisse in Co-Simulationsumgebungen (**Software-Konnektivität**)

Eine durchgeführte Analyse zeigt, dass der Einsatz stündlich aufgelöster Eingangsdaten gegenüber Jahresmittelwerten die Ergebnisse um bis zu 40 % verändern kann.

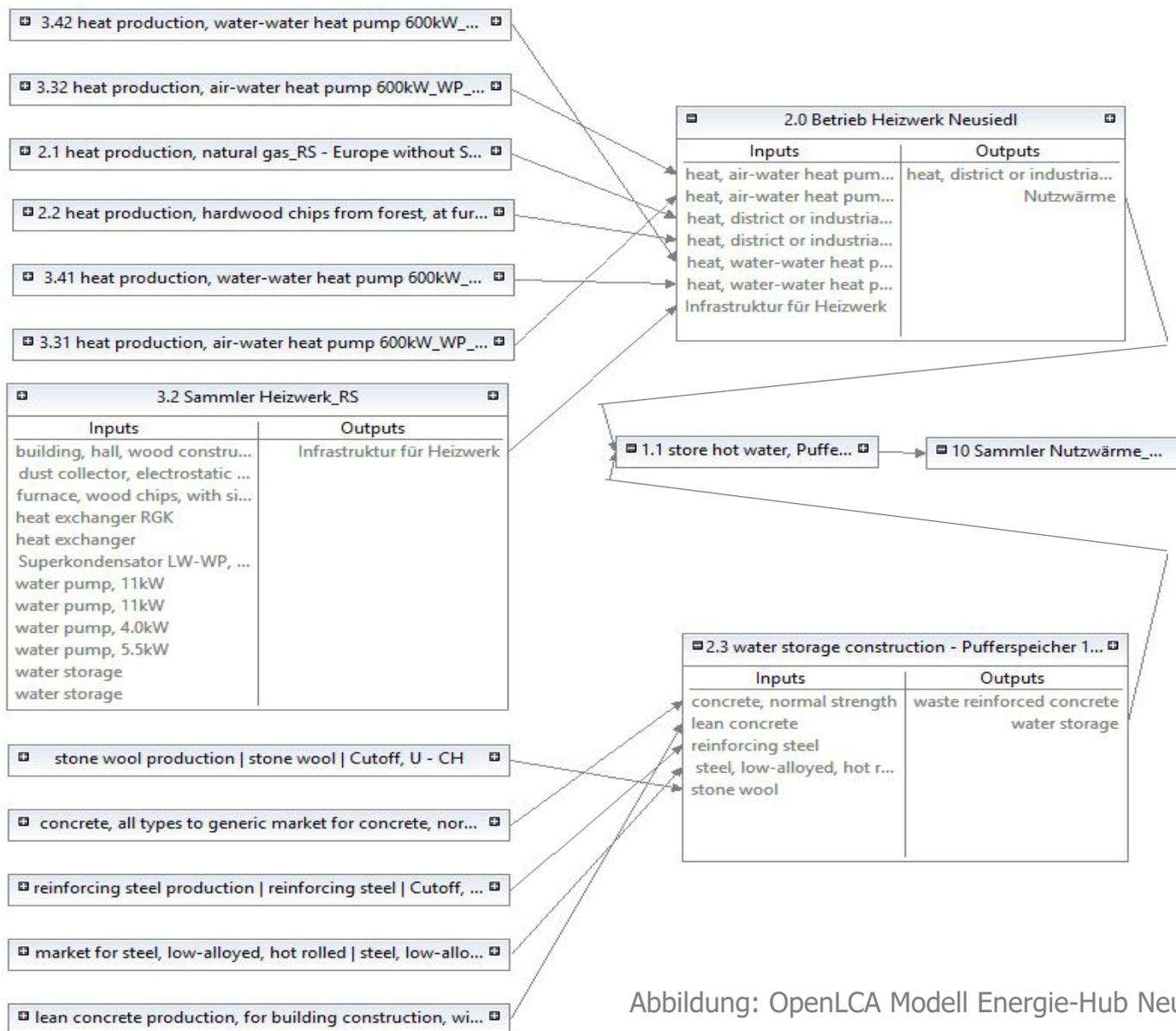
Operation phase – energy mixes, why time resolved



Marginal electricity and heat suppliers

?

Ökologische Bewertung – Test Case



Das Systemmodell wurde in *openLCA* (GreenDelta GmbH, 2023) modelliert.

Die Ökobilanz wird gemäß den Normen ISO 14040 (ÖNORM EN ISO 14040, 2021) und ISO 14044 (ÖNORM EN ISO 14044, 2021) durchgeführt.

Datenquellen umfassen:

- Informationen des Unternehmenspartners
- Massen- und Energiebilanzen aus der Prozesssimulation (SimTech GmbH, 2021),
- Hintergrunddaten aus der *ecoinvent*-Datenbank v3.9.1 (Wernet et al., 2016).

Die funktionelle Einheit ist ein Megajoule thermischer Energie (1 MJ_{th}), bereitgestellt am Wärmeübertrager des Nahwärmenetzes.

Die Systemgrenzen sind konsistent mit dem technischen Modell und umfassen den gesamten Lebenszyklus („cradle-to-grave“).

Aktuelle Ergebnisse noch unveröffentlicht.

Abbildung: OpenLCA Modell Energie-Hub Neusiedl



Ökologische Bewertung – Deep Dive – Anwendung mit Speicher

LCA nach ISO 14040/44 mit OpenLCA 1.11

System: reale Energiegemeinschaft in St. Ruprecht/Raab (STMK)

Varianten:

- (A) Vanadium-Redox Flow Batterie (VRFB)
- (B) Lithium-Ionen Batterie (LIB)
- (C) ohne Speicher

Funktionelle Einheit (FU): 1 kWh Energie

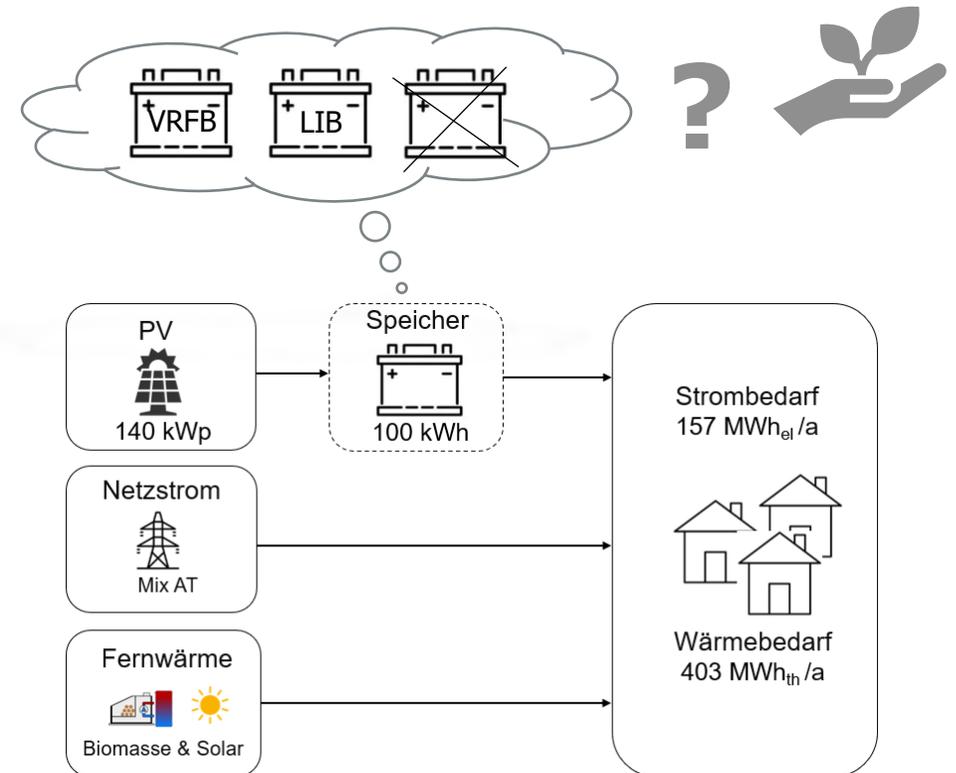
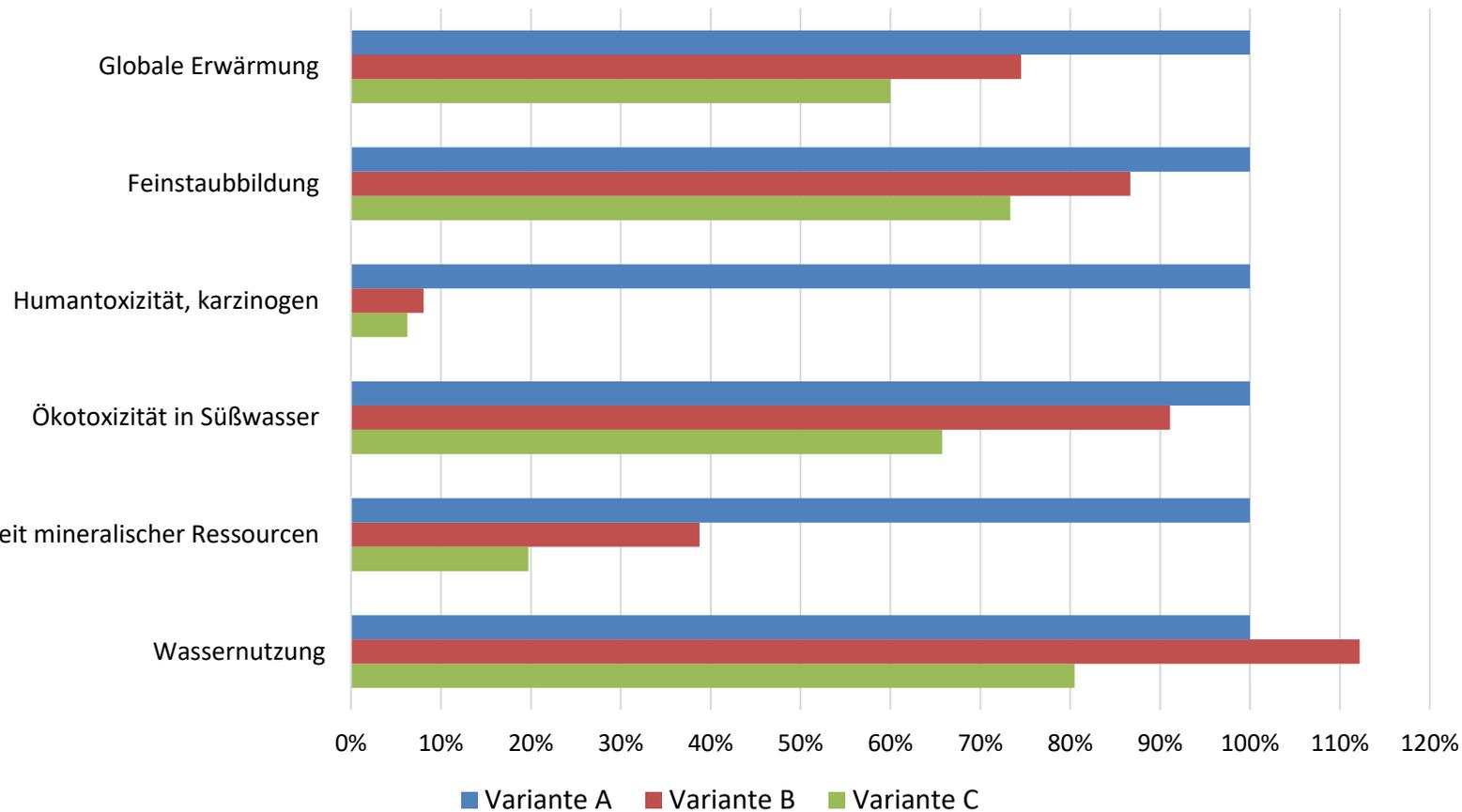


Abbildung: Systemfließbild der Energiegemeinschaft



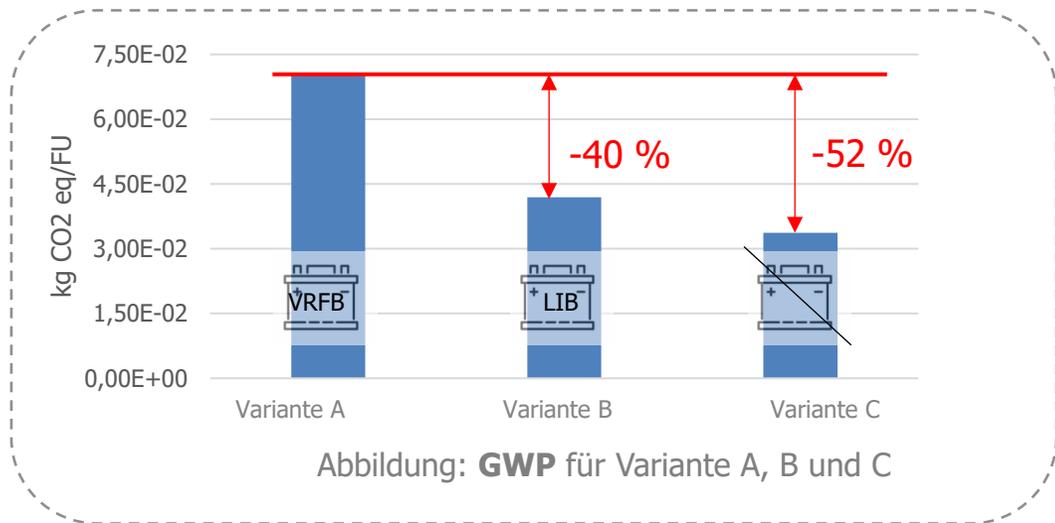
Ökologische Bewertung – Deep Dive – Anwendung mit Speicher - Ergebnissüberblick



Variante	Merkmal
Variante A	VRFB
Variante B	LIB
Variante C	Ohne Speicher

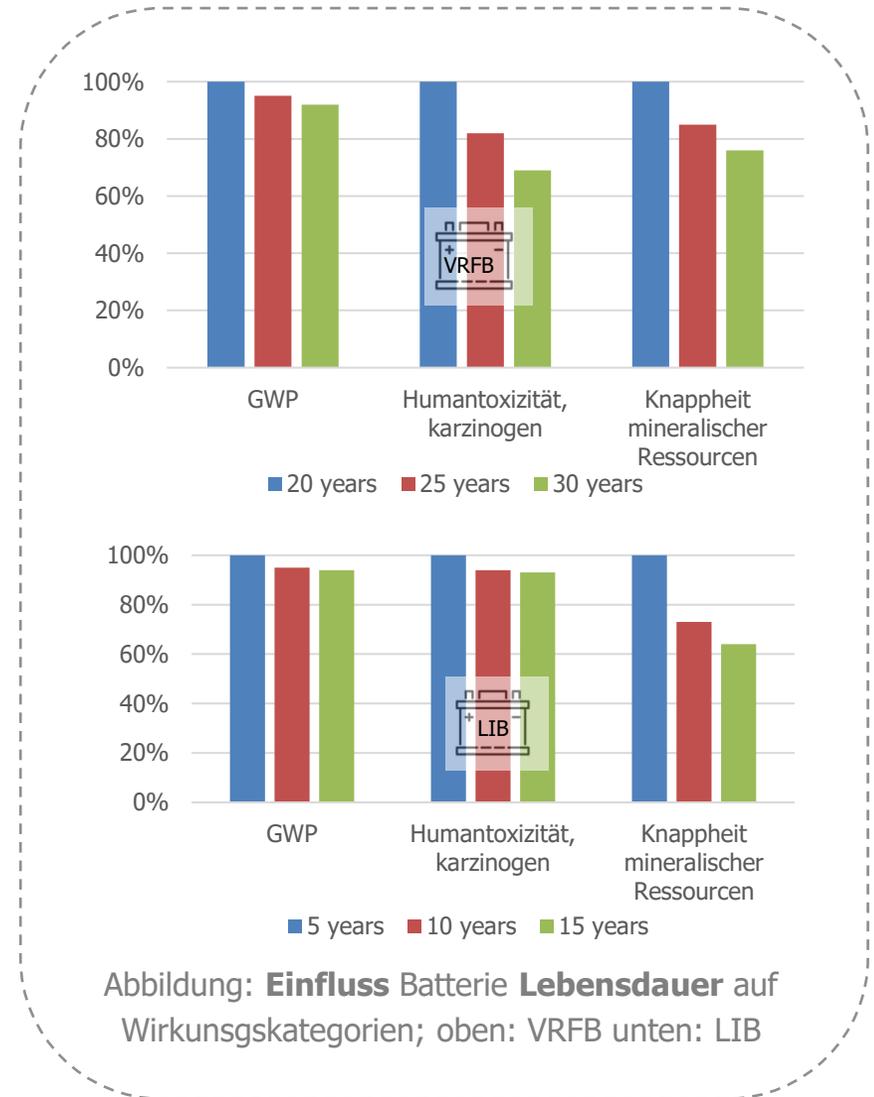
Relative Ergebnisse der Varianten A bis E - Bezogen auf Variante A als Referenzwert (100%)

Ökologische Bewertung – Deep Dive – Anwendung mit Speicher - Ergebnisse



Speichern ist nicht automatisch nachhaltig – weniger kann ökologisch mehr sein.

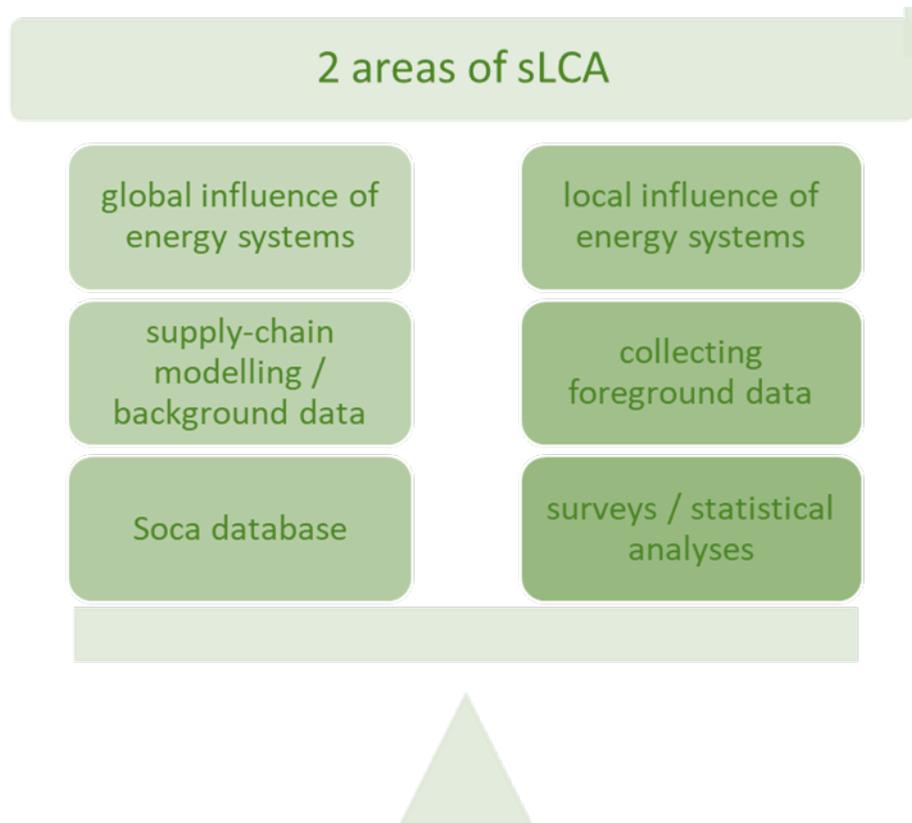
- Die technische Auslegung ist entscheidend.
- Die Umweltauswirkungen müssen mitgedacht werden





Soziale Bewertung - Methodenentwicklung

• **Unterscheidung zwischen lokalen und globalen sozialen Indikatoren** – eingeführt durch Buchmayr et al. (2022)



• **Interdisziplinärer Ansatz:** Kombination von *Social Life Cycle Assessment (SLCA)* mit empirischen Methoden, wie z. B. Stakeholder-Befragungen oder Nutzerakzeptanzstudien (Wohlschlager et al., 2023)

• **Ableitung zentraler sozialer Indikatoren** auf Basis von Fachliteratur, früheren Forschungsarbeiten, Umfragen, Expert:inneninterviews sowie Methoden wie der Korrespondenzanalyse (z. B. Costa et al., 2013; Ter Braak, 1986)

• **Gewichtung der Schlüsselindikatoren** erfolgt mithilfe der AHP: *Analytic Hierarchy Process*-Methode (Saaty, 1990)

AHP dient dazu, komplexe Entscheidungsprobleme mit mehreren, teils konkurrierenden Kriterien **systematisch zu strukturieren, zu vergleichen und zu bewerten.**



Soziale Bewertung –Test Case -sLCA

Die zentrale Fragestellung der sozialen Bewertung lautet:

- *Wie gut lassen sich soziale Auswirkungen in vorgelagerten Lieferketten modellieren?*
- *Welche vorgelagerten Ketten tragen wesentlich zu sozialen Risiken bei?*

Als methodische Grundlage dient der Leitfaden für Social Life Cycle Assessment (SLCA) des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP, 2020). Um eine methodische Kohärenz mit der Ökobilanz sicherzustellen, erfolgt die Strukturierung der Bewertung in Anlehnung an ISO 14040 (ÖNORM EN ISO 14040, 2021).

Die Analyse konzentriert sich auf vorgelagerte Ketten verschiedener Energieträger. Zur Datenbasis zählt insbesondere die *Soca v.2*-Datenbank (GreenDelta, 2021), die soziale Risikopotenziale auf Prozess- und Sektorebene bereitstellt.

Ergebnisse für Erdgas sind in Tabelle dargestellt.

Tabelle: Soziale Wirkungsabschätzung der vorgelagerten Lieferkette der Erdgasbereitstellung basierend auf der Soca-Datenbank – vorläufige Ergebnisse

Stakeholder	Wirkungskategorie	Ergebnis	Einheit
Value Chain Actors	Public sector corruption	0.23226	C med risk hours
Local Community	Biomass consumption	0.23175	BM med risk hours
Local Community	Drinking water coverage	0.22972	DW med risk hours
Workers	Fair Salary	0.17761	FS med risk hours
Society	Risk of conflicts	0.14057	ROC med risk hours
Society	Contribution of the sector to economic development	0.00089	CE med risk hours



Soziale Bewertung – Qualitative Methode

Mikro-soziale Ebene:

- Wahrnehmungen von Individuen und Gruppen (öffentliche Meinung) im Zusammenhang mit bestimmten Objekten, z. B. Infrastrukturen
- Bewertung von Parametern, spezifischen Kontexten und lokalen Auswirkungen mit psychosozialer Dichte
- Vielfalt von Gemeinschaften, deren Einbindung unterschiedlich stark ausgeprägt ist

Meso-politische Ebene:

- Öffentliche Politiken, gesetzliche Regelungen usw. von nationalen, regionalen und lokalen Behörden
- Häufig als „politischer Rahmen“ behandelt – als vorgegebene Rahmenbedingung
- Ziel: Sicherstellung öffentlichen Vertrauens in Projekte, Vermeidung von Ablehnung z. B. bei top-down implementierten Vorhaben

Makro-ökonomische Ebene:

- Einbindung globalisierter Aspekte, z. B. internationaler Energiemärkte



Soziale Bewertung – Qualitative Methode

Mikro-soziale Ebene:

- Wahrnehmungen von Individuen und Gruppen (öffentliche Meinung) im Zusammenhang mit bestimmten Objekten, z. B. Infrastrukturen
- Bewertung von Parametern, spezifischen Kontexten und lokalen Auswirkungen mit psychosozialer Dichte
- Vielfalt von Gemeinschaften, deren Einbindung unterschiedlich stark ausgeprägt ist

Meso-politische Ebene:

- Öffentliche Politiken, gesetzliche Regelungen usw. von nationalen, regionalen und lokalen Behörden
- Häufig als „politischer Rahmen“ behandelt – als vorgegebene Rahmenbedingung
- Ziel: Sicherstellung öffentlichen Vertrauens in Projekte, Vermeidung von Ablehnung z. B. bei top-down implementierten Vorhaben

Makro-ökonomische Ebene:

- Einbindung globalisierter Aspekte, z. B. internationaler Energiemärkte



Soziale Bewertung – Qualitative Methode-Test Case

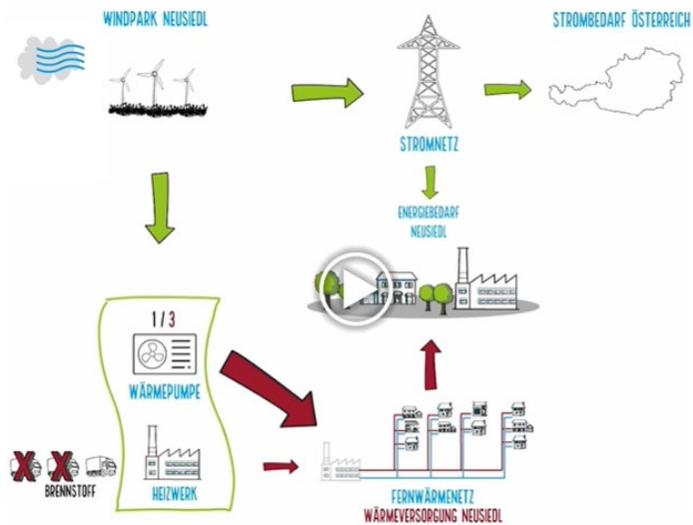
Bewertung des Vordersystems – Lokale soziale Auswirkungen

Basierend auf einer **Stakeholder-Befragung** konnten **zentrale Indikatoren** identifiziert werden, darunter:

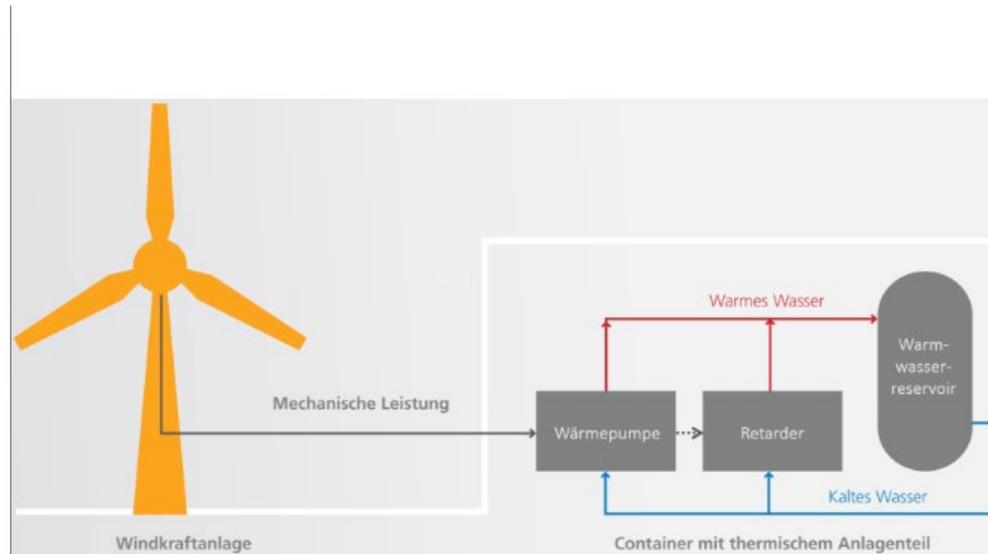
- Akzeptanz
- Versorgungssicherheit
- Auswirkungen auf lokale Beschäftigung

Eine Analyse sozialer Bewertungskriterien des Energiesystems in Neusiedl wurde auf Grundlage von drei vorgeschlagenen Lösungsansätzen durchgeführt

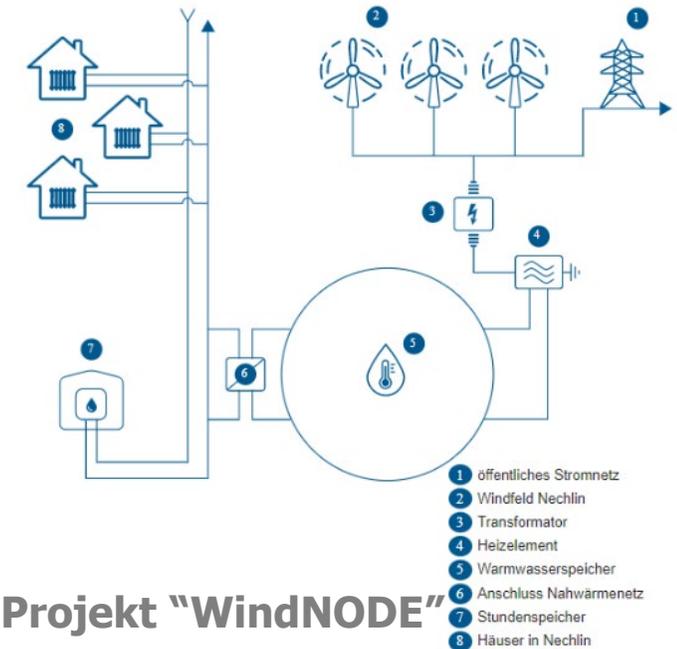
Soziale Bewertung – Qualitative Methode – Test Case Beschreibung alternativer Projektoptionen



Projekt "Energy Hub Neusiedl"



Projekt "Windthermie"

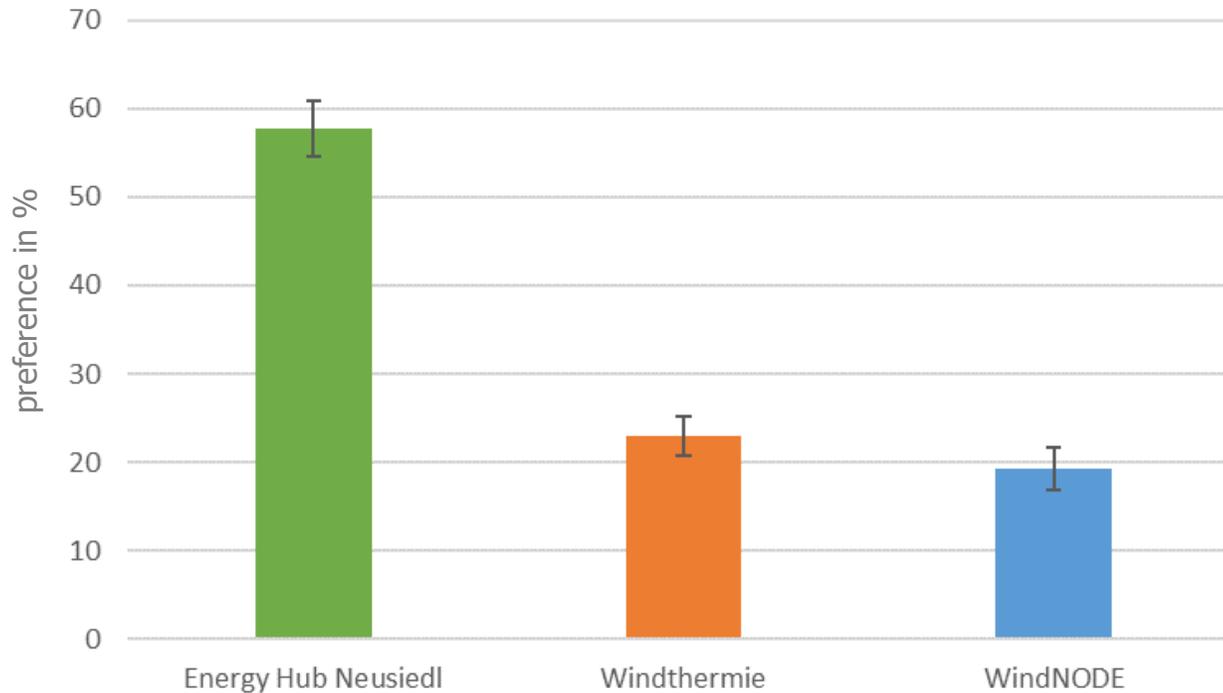


Projekt "WindNODE"

Projekte mit gleichem Ziel, aber unterschiedlichen Technologien zur Wärmeerzeugung aus Windenergie



Soziale Bewertung – Qualitative Methode - Test Case - Resultate



Durchschnittliche Präferenzbewertung der Projekte je Teilnehmer:in

- Ergebnisse basieren auf einer Stichprobe von $n = 61$ Stakeholdern:
 - Technologieanbieter: 1
 - Private Endnutzer:innen: 46
 - Externe Expert:innen: 14



Ökonomische Bewertung- Methodenentwicklung

Zwei Forschungsschwerpunkte im Bereich der ökonomischen Bewertung:

1. Globaler Aspekt:

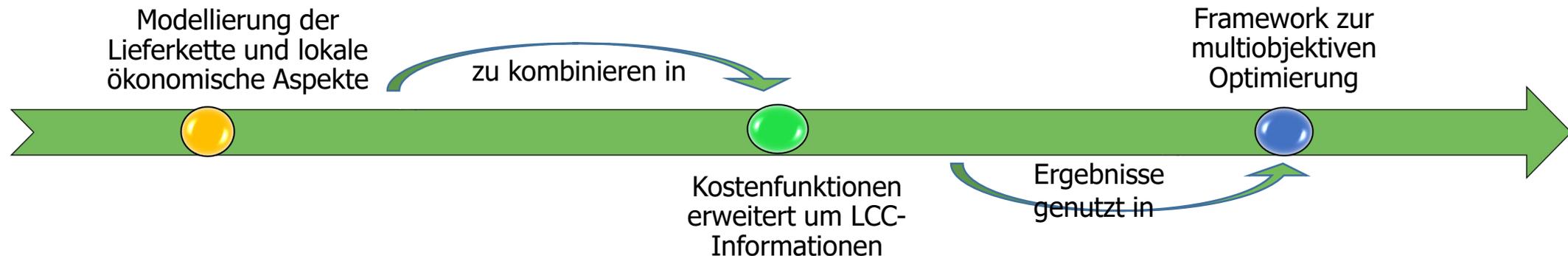
Quantitative Modellierung der Lieferkette auf Basis von Lebenszykluskostenanalysen (LCC), gestützt auf Datenbanken und/oder Literaturquellen.

2. Lokale ökonomische Aspekte:

Bewertung wirtschaftlicher Auswirkungen des Energiesystems auf lokaler Ebene unter Verwendung von **Vordergrunddaten**, insbesondere für die **Nutzungsphase**

Weitere methodische Entwicklungen:

- **Weiterentwicklung bestehender mathematischer Modelle**
- **Einbindung von Kostenfunktionen** in ein Framework der **multiobjektiven Optimierung**





Ökonomische Bewertung- Test Case -LCC

Die Lebenszykluskostenanalyse (LCC) stellt einen wesentlichen Bestandteil der Nachhaltigkeitsbewertung integrierter Energiesysteme dar und wird **im Einklang mit der ISO 14040** sowie der Methodik der Lebenszyklusanalyse (LCA) durchgeführt (Hunkeler et al., 2008; Heijungs et al., 2013).

Funktionelle Einheit:

Ein Megajoule thermische Energie (1 MJ_{th}), bereitgestellt am Wärmeübertrager des Nahwärmenetzes in Neusiedl.

Systemgrenzen:

Berücksichtigt werden alle physisch installierten und für den Betrieb notwendigen Komponenten, darunter:

- Biomassekessel mit Elektrofilter
- Gaskessel
- Luft-Wasser- und Wasser-Wasser-Wärmepumpen
- Wärmeübertrager, Speicher, Pumpen
- Gebäudeinfrastruktur

Ermittelte Lebenszykluskosten der Heizungsanlage: 0,023€ pro MJ_{th}

Beitragsanalyse der Komponenten an den Gesamtkosten:

- Luft-Wasser-Wärmepumpen: **32,7 %**
- Biomasseverbrennung: **26,6 %**
- Wasser-Wasser-Wärmepumpen: **23,4 %**

Der überwiegende Anteil der Lebenszykluskosten (**86,6 %**) entfällt auf die **Betriebsphase** (vgl. Abbildung).

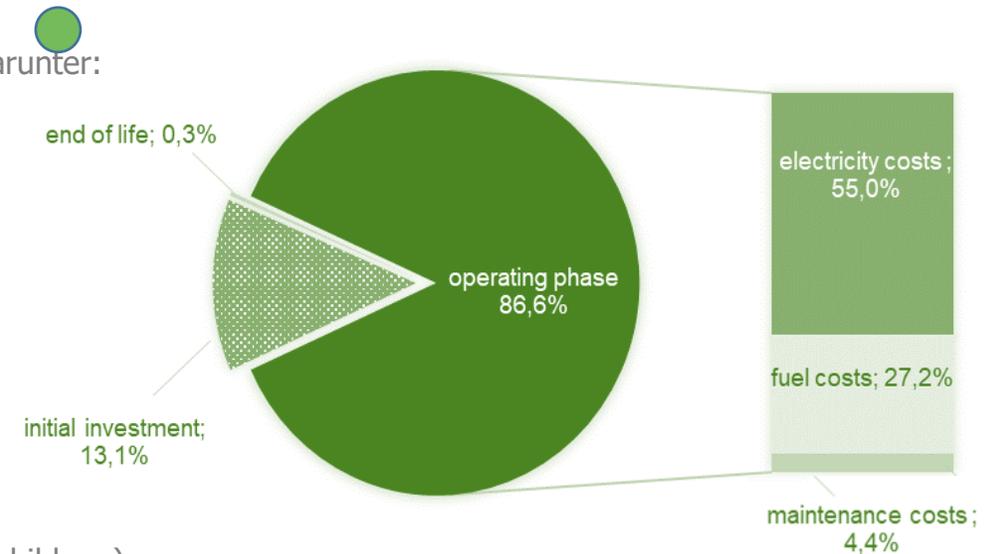
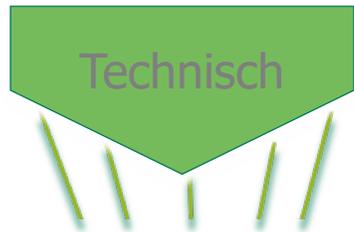


Abbildung: Beiträge der Lebenszyklusphasen (Anfangsinvestition, Betriebsphase und End-of-Life) zu den Lebenszykluskosten; separate Darstellung der Anteile innerhalb der Betriebsphase; Angaben in Prozent

LiSA-Konzeptübersicht – Informationen zusammenführen



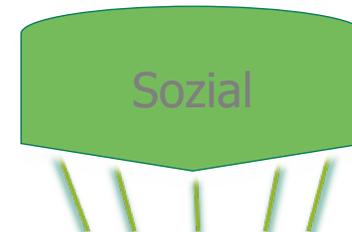
Die Ergebnisse **müssen mehrere Kriterien erfüllen:**

- Effizienz
- Grad der Flexibilität
- Grad der Eigenversorgung

→ Ziel ist eine kostenoptimierte Effizienz im Sinne einer techno-ökonomischen Bewertung



LCA-Ergebnisse umfassen in der Regel **15 bis 20 Einzelindikatoren**, die überwiegend in drei bis vier Schutzgüter (Areas of Protection) zusammengefasst werden.
→ Sollte ein „neues“ Schutzgut definiert werden?

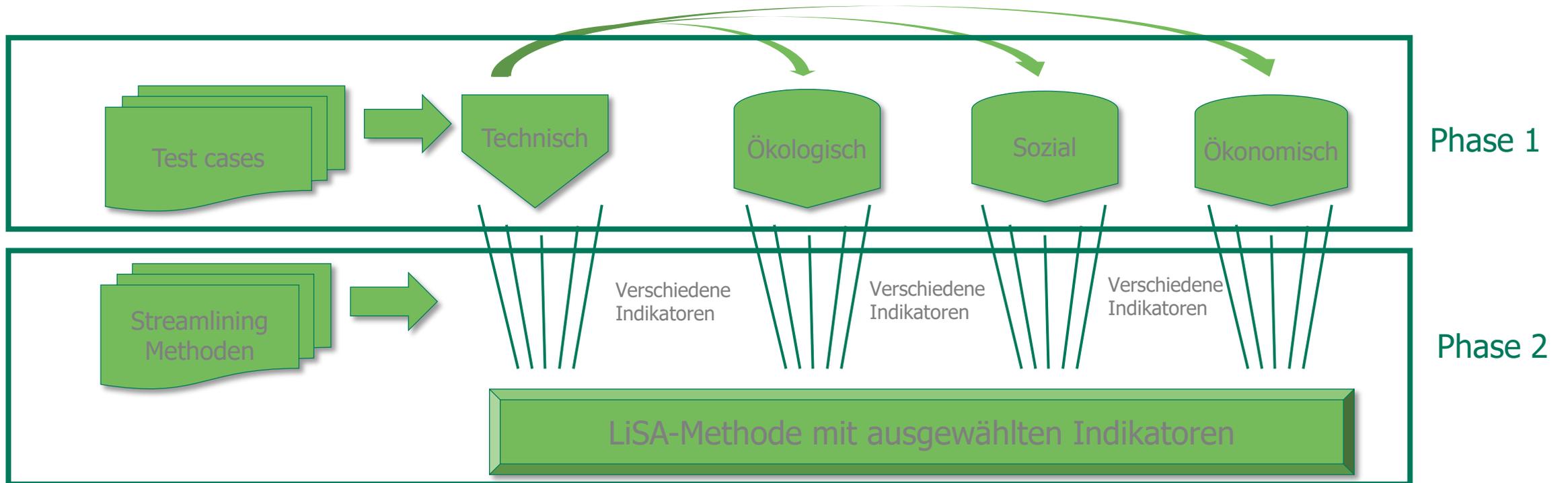


Hintergrundsystem:
Die Ergebnisse werden in mrh (medium risk hours) quantifiziert – für alle **55 Indikatoren** der SLCA auf Basis der soca-Datenbank.
Lokale Effekte:
Ist eine Definition geeigneter Akzeptanzindikatoren oder die Bildung von Indikatorenbündeln möglich?



Die ermittelten Lebenszykluskosten (LCC) in Euro bieten eine geeignete Grundlage zur Einbindung in techno-ökonomische Optimierungsmodelle

LiSA-Konzeptübersicht – Entwicklung methodischer Ansätze



Basisinformationen für die technische Simulation werden durch die Testfälle bereitgestellt.

Grundlagen für die ökologische, soziale und ökonomische Bewertung stammen aus den Ergebnissen der technischen Simulationen.

Methodische Vereinfachung durch **Reduktion** der Anzahl an **Bewertungsindikatoren** mit MCDA (*Multi-Criteria Decision Analysis*)



LiSA-Konzeptübersicht – Softwareaspekte und Integration

- **Technische Modellierung:**
Die Modellierung mit **Dymola/Modelica** unter Nutzung verschiedener Bibliotheken liefert zufriedenstellende Ergebnisse.
- **Ökobilanzierung und kombinierte Bewertung:**
Die Anwendung von **openLCA** (GreenDelta, 2022) mit den **Datenbanken ecoinvent** (Wernet et al., 2016) und **soca** (GreenDelta, 2021) ermöglicht eine **kombinierte Modellierung von LCA, LCC und SLCA** auf Basis eines einzigen Produktsystemmodells – bisher mit vielversprechenden Ergebnissen.
- **Techno-ökonomische Optimierung:**
Eine **Python-basierte Lösung für die multi-kriterielle techno-ökonomische Optimierung** wurde erfolgreich getestet und liefert konsistente Resultate.

Zwei zentrale Untersuchungsbereiche in weiterer Phase im Hinblick auf die Softwareintegration:

- **Prüfung der Schnittstellenverfügbarkeit**
→ Gibt es für jede genutzte Softwarelösung eine praktikable Schnittstelle zur Python-basierten Optimierungslösung, und ist deren Integration technisch und methodisch umsetzbar?
- **Integration lokaler Sozialdaten**
→ Wie können **lokale soziale Effekte** in bestehende **SLCA-Modelle** integriert werden, die bislang auf **globalen Lieferketteninformationen** der soca-Datenbank beruhen?

LiSA-Konzeptübersicht – Das Ziel

- Integration der technisch-ökonomischen Optimierung mit ökologischen und sozialen Bewertungskriterien (inkl. qualitativer Aspekte)
- Erarbeitung eines modularen Leitfadens oder Tools (Baukastensystem)
- Bereitstellung fundierter Ergebnisse zur Unterstützung von Entscheidungsträger:innen in Planung und Umsetzung nachhaltiger Energiesysteme

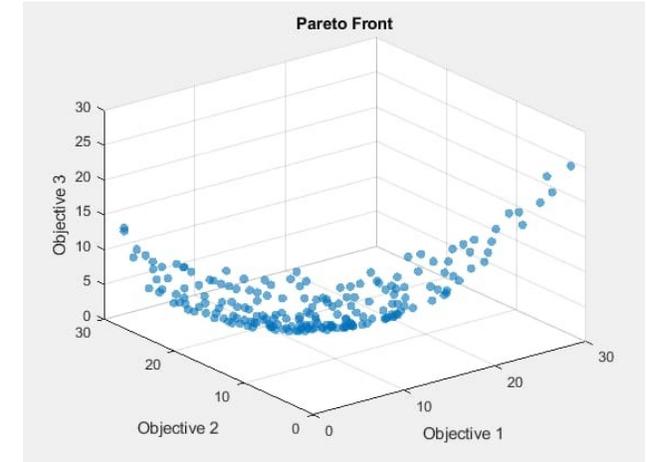


Abbildung: Pareto Front als Darstellungsoption

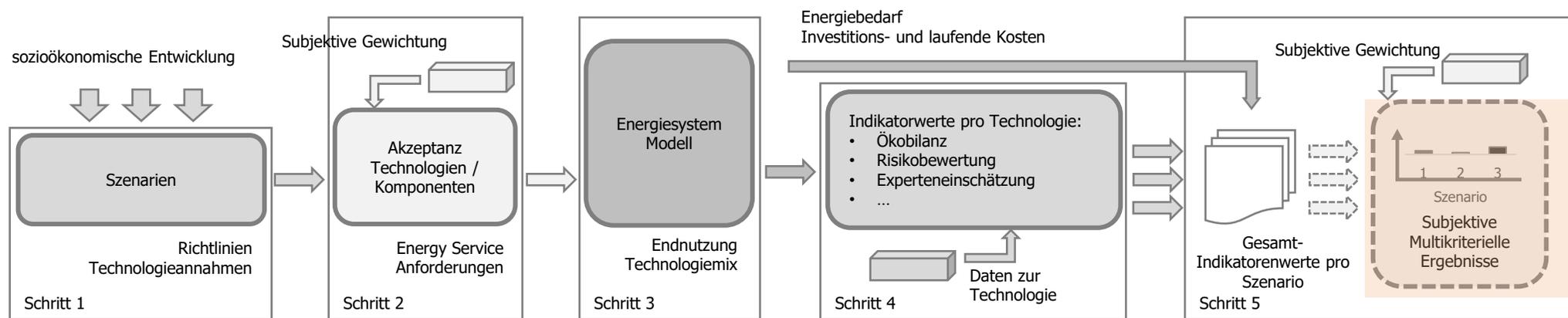


Abbildung: Modell zu einer mehrdimensionalen nachhaltigen Energieversorgung

Literatur

- Buchmayr, A., Verhofstadt, E., Van Ootegem, L., Thomassen, G., Taelman, S. E., & Dewulf, J. (2022). Exploring the global and local social sustainability of wind energy technologies: An application of a social impact assessment framework. *Applied Energy*, 312, 118808. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118808>
- Cano-Londoño, N., Heriberto, C., & Krisztián, B. (2022). Integrated Sustainability Assessment: Exergy, Emery, Life Cycle Assessment. *Frontiers in Sustainability*, 3, 921874. <https://doi.org/10.3389/frsus.2022.921874>
- Chen, Y., Wang, J., & Lund, P. D. (2020). Sustainability evaluation and sensitivity analysis of district heating systems coupled to geothermal and solar resources. *Energy Conversion and Management*, 220(2), 113084. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113084>
- Costa, P. S., Santos, N. C., Cunha, P., Cotter, J., & Sousa, N. (2013). The use of multiple correspondence analysis to explore associations between categories of qualitative variables in healthy ageing. *Journal of Aging Research*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/302163>
- GreenDelta. (2021). *Soca v.2 Database (v.2)* [Software]. GreenDelta GmbH.
- GreenDelta. (2022). *openLCA v.1.11* [Software]. GreenDelta GmbH.
- Heijungs, R., Settanni, E., & Guinée, J. (2013). Toward a computational structure for life cycle sustainability analysis: Unifying LCA and LCC. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(9), 1722–1733. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0461-4>
- Hunkeler, D., Lichtenvort, K., & Rebitzer, G. (2008). *Environmental Life Cycle Costing*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420054736>
- Li, J., Tarpani, R. R. Z., Stamford, L., & Gallego-Schmid, A. (2023). Life cycle sustainability assessment and circularity of geothermal power plants. *Sustainable Production and Consumption*, 35, 141–156. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.10.027>
- Martín-Gamboa, M., Quinteiro, P., Dias, A. C., & Iribarren, D. (2021). Comparative Social Life Cycle Assessment of Two Biomass-to-Electricity Systems. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(9), 4918. <https://doi.org/10.3390/ijerph18094918>
- ÖNORM EN ISO 14040. (2021). *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020)*. Austrian Standards Institute.
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- Ter Braak, C. J. F. (1986). Canonical correspondence analysis: A new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, 67(5), 1167–1179. <https://doi.org/10.2307/1938672>
- UNEP. (2020). *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organisations 2020*. United Nations Environment Programme. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/34554>
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): Overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>
- Wohlschlager, D., Bluhm, H., Beucker, S., Pohl, J., & Fröhling, M. (2023). Overcoming challenges in life cycle assessment of smart energy systems – A map of solution approaches. *Journal of Cleaner Production*, 423, 138584. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138584>
- Zeug, W., Bezama, A., & Thrän, D. (2022). Application of holistic and integrated LCSA: Case study on laminated veneer lumber production in Central Germany. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 27(12), 1352–1375. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02098-x>
- Zeug, W., Yupanqui, K. R. G., Bezama, A., & Thrän, D. (2023). Holistic and integrated life cycle sustainability assessment of prospective biomass to liquid production in Germany. *Journal of Cleaner Production*, 418, 138046. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138046>

Eva-Maria Wiener

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Burgenland

Department Energie & Umwelt

Josef Ressel Zentrum für vernetzte Systembewertung
einer nachhaltigen Energieversorgung (LiSA)

eva-maria.wiener@hochschule-burgenland.at

<https://www.hochschule-burgenland.at>



Connect on LinkedIn

© Florian Stix