

Modelling-to-Generate-Alternatives (MGA) als innovativer Ansatz zur Quantifizierung qualitativer Transformationspfade zu einem klimafreundlichen Leben

Gustav Resch, Florian Hasengst (AIT); Perine Cunat (TU Wien);
Andreas Novy, Simon Grabow (WU Wien)

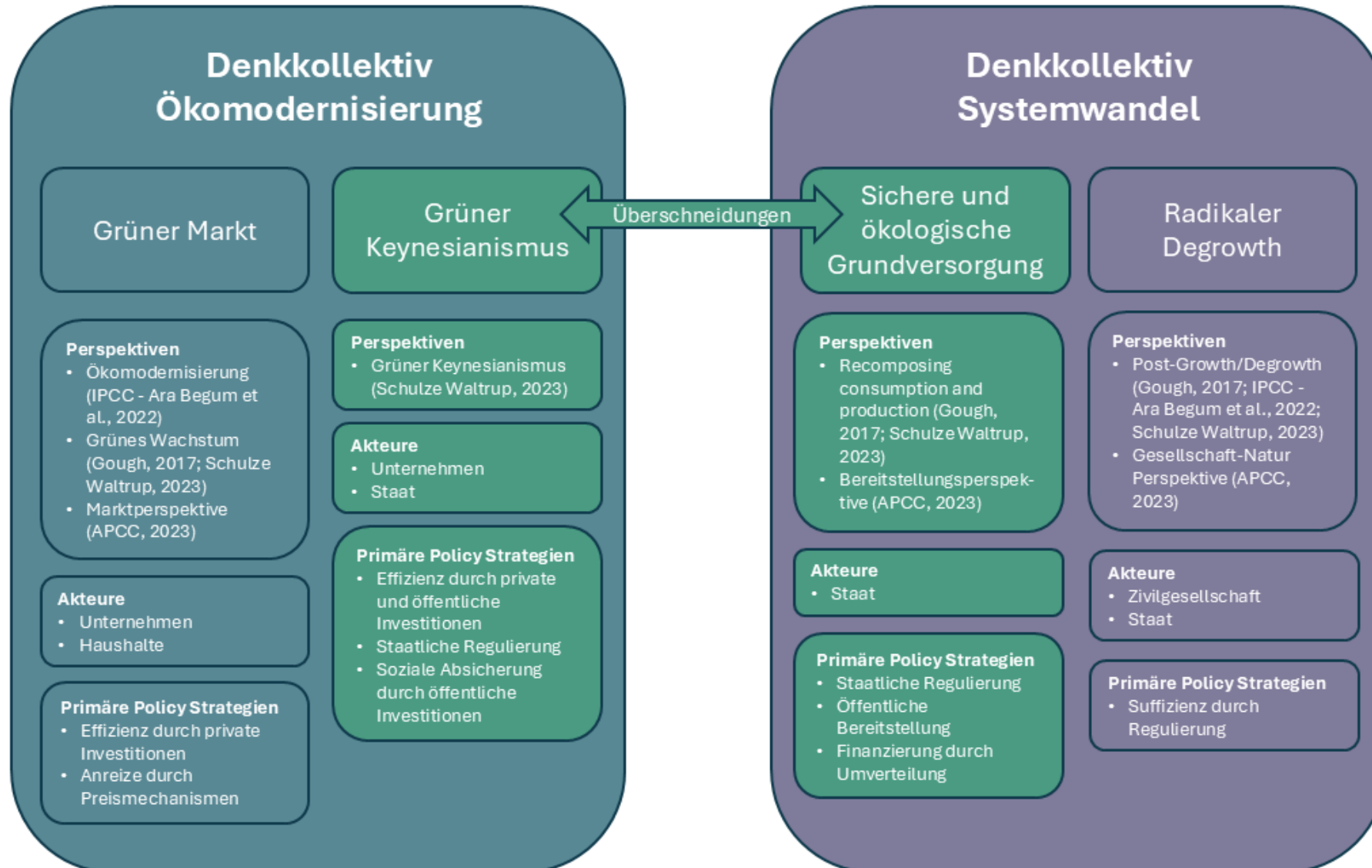
Kontakt: gustav.resch@ait.ac.at, <https://www.ait.ac.at/>

EnInnov 2026, Graz, 13. Februar 2026



- Das ACRP-Projekt **Quantifying Qualitative Transformation Pathways towards Climate-friendly Living (Q2-Pathways)** untersucht mögliche **Transformationspfade zu einem klimafreundlichen Leben** in Österreich – und damit verbunden ebenso zu einem klimafreundlichen Energiesystem.
- Hier werden **sowohl technologische als auch gesellschaftliche Perspektiven** integriert.
- Ziel des Projekts ist es, Entscheidungsträgern **eine breitere Palette von Handlungsoptionen** zu bieten, die **nicht nur die kosteneffizienteste Lösung**, sondern auch **gesellschaftliche Akzeptanz** und **politische Machbarkeit** berücksichtigen.
 - Hierfür wurden **qualitative Szenarien** zur **Energienachfrage** und **Transformationspfaden** entwickelt ...
 - ... und durch **quantitative Modellierungen** ergänzt werden.

QUALITATIVE TRANSFORMATIONSPFADE: DENKKOLLEKTIVE DER KLIMAFORSCHUNG UND KLIMAPOLITIK



Quelle: Klimafreundliche Transformationspfade, Novy et al., 2024

HERAUSFORDERUNGEN GEGENWÄRTIGER KLIMAFORSCHUNG & KLIMAPOLITIK



AUSTRIAN INSTITUTE
OF TECHNOLOGY



- **Wie** wird eine **wirksame Klimapolitik politisch durchsetzbar?**
 - **Wie** kann ein **klimafreundliches Leben** - nicht "nur" die Dekarbonisierung - **erreicht werden?**
 - **Multiperspektivische Klimaforschung problematisiert:**
 - Radikale vs. inkrementelle Maßnahmen
 - Kritische Analyse vs. Pragmatische Politikvorschläge
 - Konsens vs. Kompromiss
 - **Politische Implikationen:** In der gegenwärtigen Situation **behindern dualistische Analysen von „Ökomodernisierung versus Systemwandel“** sowohl das **Verständnis als** auch die **Bildung von Allianzen**
- unkonventionelle **Allianzen von grünem Wachstum und Degrowth sind notwendig**, um reaktionären fossil-konservativen Bewegungen zu begegnen

Quelle: basierend auf Klimafreundliche Transformationspfade, Novy et al., 2024

ENERGIESYSTEMMODELLIERUNG: WARUM?



AUSTRIAN INSTITUTE
OF TECHNOLOGY



- **Aufzeigen der Auswirkungen** der unterschiedlichen Nachfrageentwicklungstrends **auf die Energieerzeugungsseite** (Ausbau Erneuerbarer und anderer Systemkomponenten wie Speicher, etc.)
- **Mehr Nachfrage ► Höherer Ausbau Erneuerbarer** etc. ... und?
 - Berücksichtigung **zentraler Restriktionen**:
 - **Realisierbare Potenziale** Erneuerbarer Energien
 - **Systemkosten** auf Ebene des Energiesystems
 - **Versorgungssicherheit** auf Systemebene (Angebot = Nachfrage)
 - **Energieszenarien als Basis** für spätere Analyse der volkswirtschaftlichen Folgewirkungen (DYNK-Modell, @WIFO)
- Zentrale Frage aus unserer Sicht: **Wie können wir hier die "Q2-Philosophie" am besten widerspiegeln?**

ENERGIESYSTEMMODELLIERUNG DER DEKARBONISIERUNGSPFADE - ABER WIE?

Kritikpunkte an klassischen Energiesystemoptimierungsmodellen

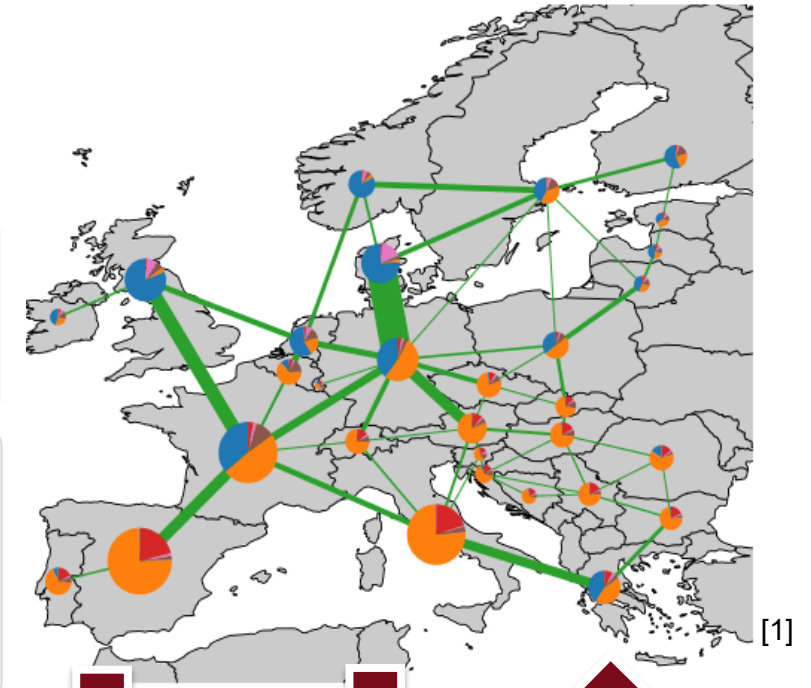
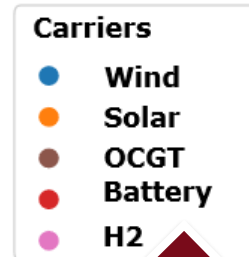
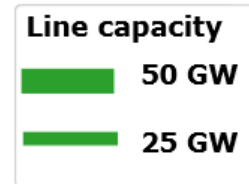
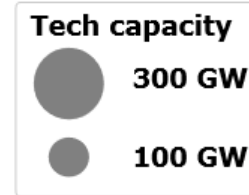
- ▶ Eine **einzigste kostenoptimale Lösung** ist oft **fernab der Realität** hinsichtlich mancher Aspekte
- ▶ Kostenprojektionen sind von **Unsicherheit** geprägt

Der Ansatz **Modelling-to-Generate-Alternatives** (MGA) untersucht auch alternative Wege

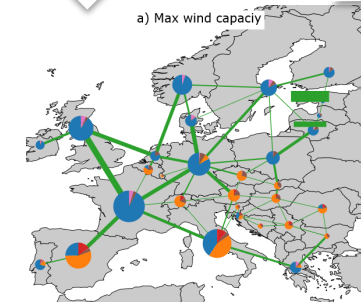
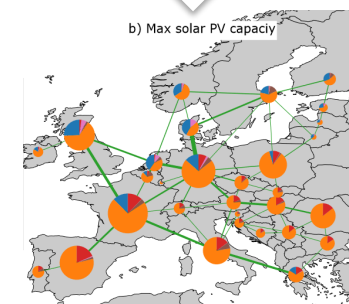
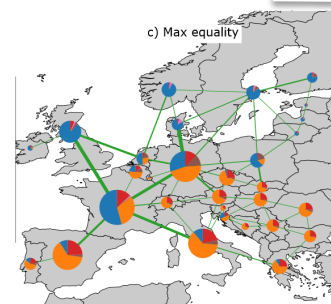
- ▶ **Aufzeigen alternativer Lösungswege** innerhalb eines vordefinierten Kostenrahmens
- ▶ Alternative Wege zeigen Entscheidungsträgern den **Handlungsspielraum** und die **Konsequenzen**
- ▶ Alternative Wege **reflektieren** oftmals auch besser **andere Realitäten**

Diverse beinahe-optimale Lösungen basierend
auf MGA (innerhalb einer 10%
Kostenbandbreite)

Deterministische kostenoptimale Lösung (Kostenreferenz)



[1]



Aufzeigen beinahe-optimaler Lösungen

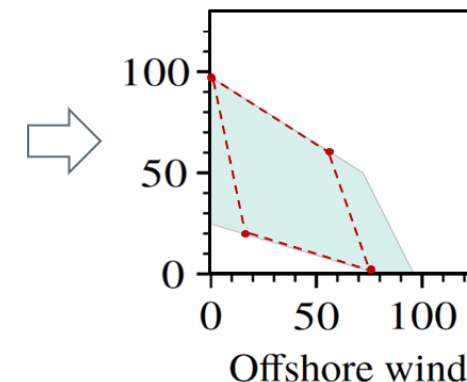
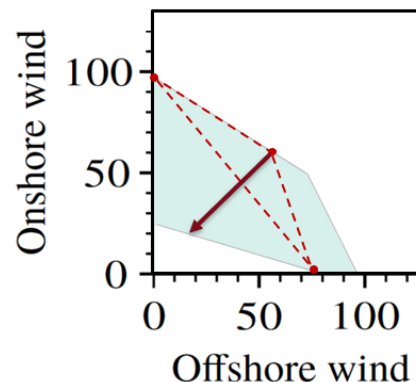
Bereits eine geringfügige Erhöhung der Kosteneffizienzschranke gibt Raum für diverse alternative Lösungswege

Ausgangspunkt ist die klassische kostenoptimale Lösung (c^*) ...

$$\begin{aligned} \min_x c &= f(x) \\ h(x) &= 0 \\ g(x) &\leq 0 \end{aligned}$$

... Aufzeigen diverser **beinahe-kostenoptimaler Alternativlösungen** durch Lösen des MGA-Problems mittels unterschiedlicher Gewichtungsfaktoren w_i

$$\begin{aligned} \min_x \sum_i w_i \cdot x_i^{(cap)} \\ h(x) &= 0 \\ g(x) &\leq 0 \\ f(x) &\leq (1 + \epsilon) c^* \end{aligned}$$



- True near-optimal space
- Approximated space
- Computed near-optimal solutions

1. Unterstützung von vorausschauender Systemplanung

- Identifizieren von "must-have" bzw. "must-avoid" Technologien
- Aufzeigen alternative Lösungsansätze jenseits reiner Kosteneffizienz (z.B. öffentliche Akzeptanz, (vereinfachter) Implementierungsaufwand, Landnutzung/Flächenversiegelung...)

2. Breites Anwendungsspektrum

- Anwendbar für vielerlei Optimierungsprobleme
- Angewandt in der Energieplanung auf lokaler als auch (multi)nationaler Ebene, im Stromsektoren und anderen (gekoppelten) Energiesektoren

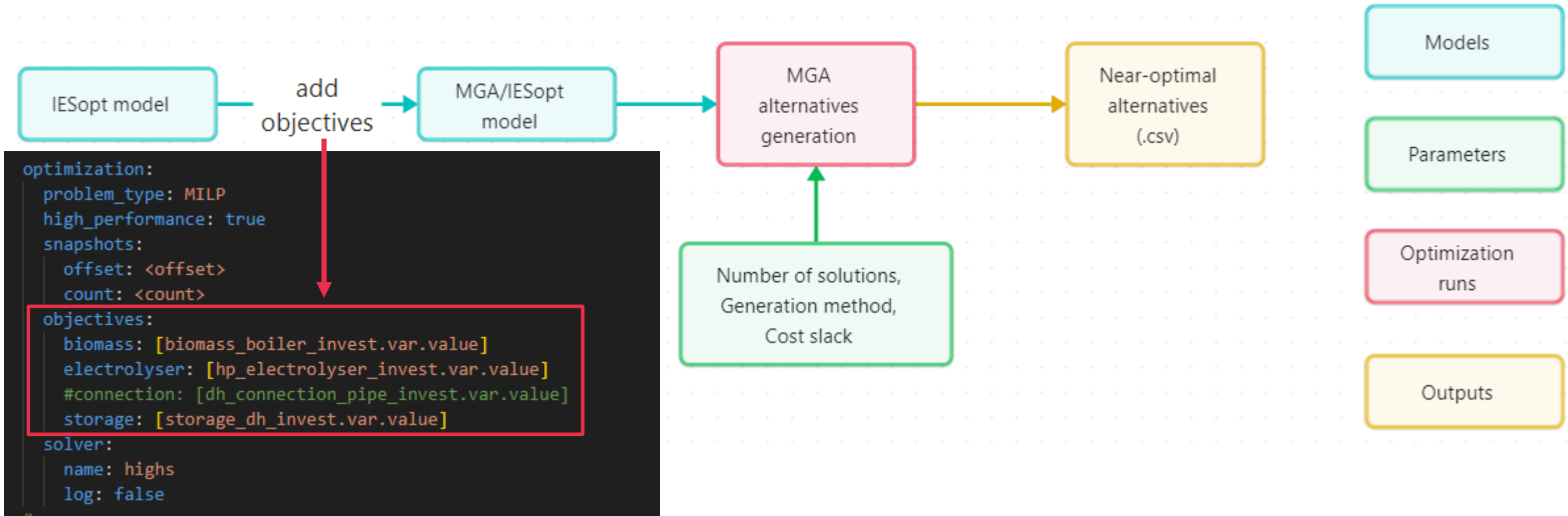
3. Noch eine Nische, aber mit aktiver User Community

- ~35 Energieplanungsanwendungen seit 2010

4. (Noch) Hoher Rechenaufwand, mit Potenzial zur Verringerung/Verbesserung

- PhD-Kooperation zwischen AIT und TU Delft zur Effizienzsteigerung von MGA-Ansätzen

TECHNISCHE TIPPS (I): IMPLEMENTIERTER WORKFLOW (IESopt @AIT)



MGA alternatives generation:

1. Solve with IESopt to minimize costs
2. Solve with IESopt to minimize a weighted sum of the secondary objectives.
Available weighting method: Hop-Skip-Jump (HSJ), Random, MinMax each secondary objective
3. Repeat 3 until enough alternatives are generated

TECHNISCHE TIPPS (II): HOW TO USE MGA WITH MY MODEL (EXAMPLE SCRIPT)

Configuration file of model with
secondary objectives

```
#Find optimal solution
model = IESopt.generate!("opt_hy2heat/config.iesopt.yaml")
IESopt.optimize!(model)
alternatives_summary = DataFrame(model.ext[:iesopt].results.objectives)
alternatives_summary.eps = fill(0, nrow(alternatives_summary))
optimal_cost = model.ext[:iesopt].results.objectives["total_cost"]

#Find near-optimal solutions
n_sol_min_max = 6
n_sol_rand = 20
eps_list = [1e-2, 2e-2, 5e-2]
sort!(eps_list, rev=true)

for eps in eps_list
    _, alternatives = MGA(model, n_sol_min_max, eps, "MinMax", optimal_cost)
    alternatives_summary = vcat(alternatives_summary, alternatives)
    _, alternatives = MGA(model, n_sol_rand, eps, "Random", optimal_cost)
    alternatives_summary = vcat(alternatives_summary, alternatives)
end

CSV.write("MGA_results/alternatives_min_max_rand.csv", alternatives_summary)
```

Set number of
alternatives to generate

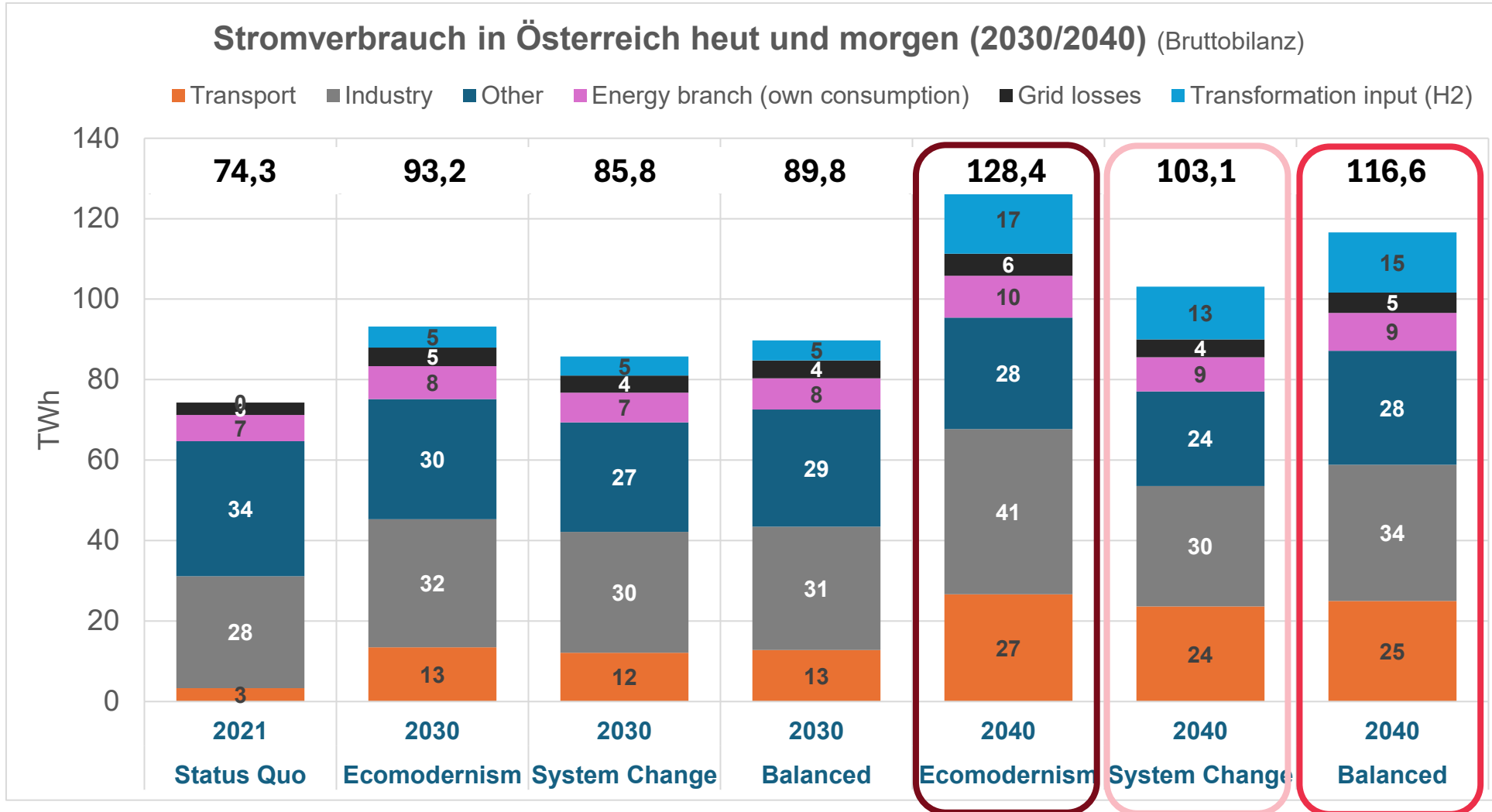
Set cost slacks

Apply MinMax method

Apply Random method

Save results as .csv

EINGANGSDATEN DER ENERGIESYSTEMMODELLIERUNG (ERGEBNIS DER QUALITATIVEN ANALYSEN)



Stromverbrauch steigt massiv an im Zuge der Dekarbonisierung des Energiesystems:

- +39%** bei systemischem Wandel (*System Change*)
- +73%** bei massivem grünem Wachstum (*Ecomodernism*)
- +57%** bei einem ausgewogenen Mittelweg (*Balanced*)

Anmerkung: Zusätzliche Stromverbrauchselemente (d.h. Großwärmepumpen in der Fernwärme) werden modellendogen ermittelt und dazu addiert!

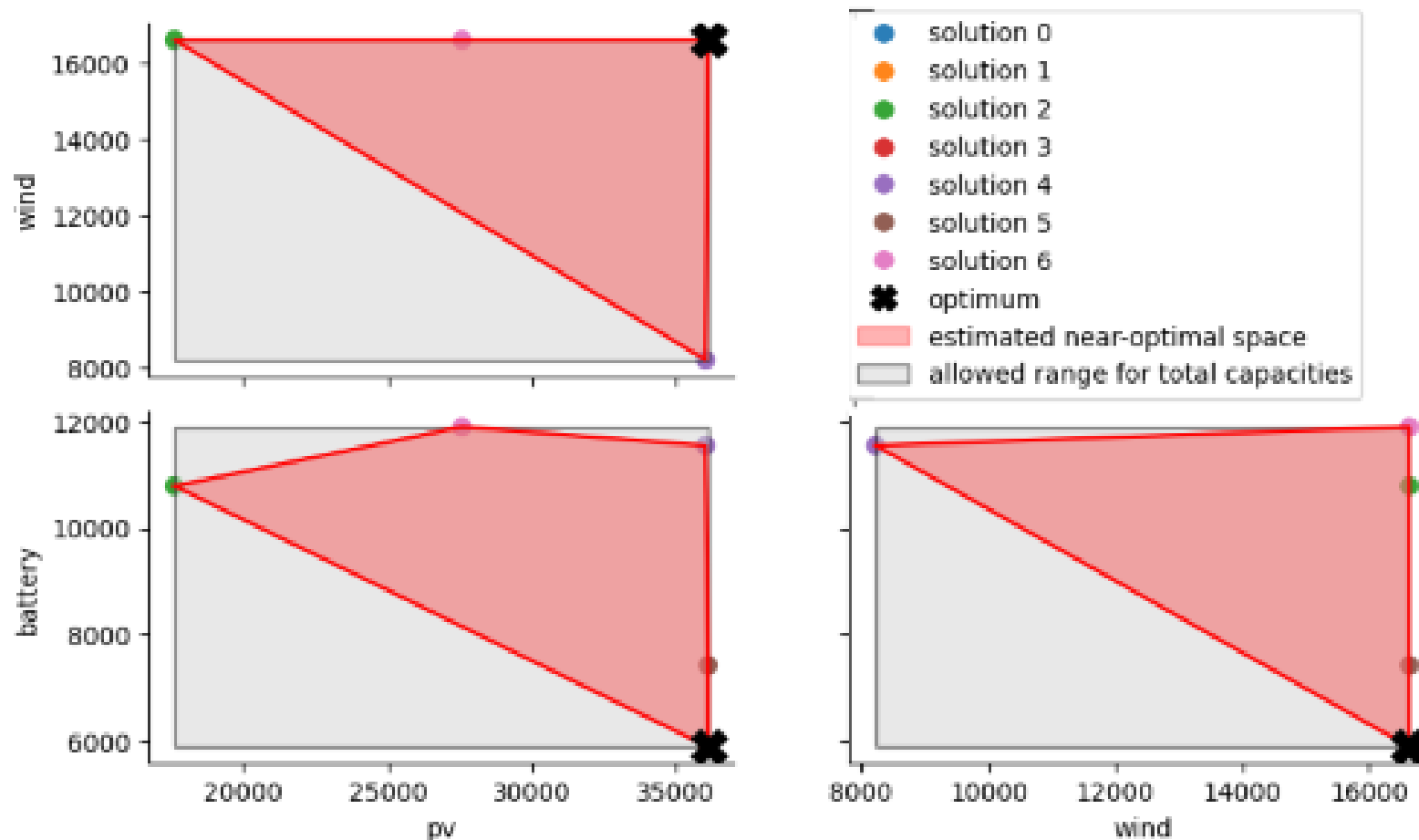
ZENTRALE ANNAHMEN IN DER ENERGIESYSTEMMODELLIERUNG

- Zeithorizont: 2040
- Untersuchte Investitionen: **PV, Wind und Batteriespeicher in Österreich**
- **Fokus auf das Stützjahr 2040** (ganzjährig, stündliche Auflösung)
- Eingangsdaten: **TYNDP NT+ 2040 mit adaptierten Ausbaupotenzialen für Erneuerbare Energien** (aufbauend auf KLIEN Studie Erneuerbare Energiepotenziale in Österreich 2030/2040)
 - Minimumausbau von Wind und PV analog zur "Low" Bandbreite der KLIEN Studie
 - Maximalausbau analog zur "High" Bandbreite der KLIEN Studie

Erneuerbare Energiepotenziale im Überblick	Technologiefeld	Einheit	Status Quo*	Realisierbares technisches Potenzial 2040			Techn. Potenzial
				Low	Medium	High	
Stromerzeugung							
Photovoltaik	TWh	7,6	32,0	39,5	50,7	1157,1	
Wasserkraft	TWh	43,5	45,6	49,3	52,0	58,6	
Windkraft	TWh	8,9	20,7	31,3	46,0	119,2	
Summe	TWh	60,1	98,4	120,1	148,7	1335,0	

ERSTE VORLÄUFIGE ERGEBNISSE: AUSBAU VON PV, WIND UND BATTERIESPEICHERN

Diagonal: Distribution of capacities across alternatives for each technology
Corner: Near-optimal space projected in 2D by pair of technologies



Blick auf 2040: Installierte Kapazitäten von PV, Wind und Batteriespeichern:

- Im Kostenoptimum werden die **verfügbaren Potenziale von Wind und PV maximal ausgeschöpft**, bei Batteriespeichern wird hingegen ein **Sockelbetrag** genutzt
- Ein **verringertes Ausbau von Wind** könnte nur durch einen **massiven Mehrausbau von Speichern** kompensiert werden
- **Bei PV** ist ein ähnliches Muster beobachtbar, aber **etwas abgeschwächer**

Gesellschaftliche Aspekte:

- Zu den **Herausforderungen gegenwärtiger Klimaforschung & Klimapolitik** zählt **das Überwinden von reaktionären fossil-konservativen Bewegungen** ► dazu brauchen wir keinen ideologischen Kleinkrieg, sondern vielmehr **unkonventionelle Allianzen von grünem Wachstum und Degrowth**
- Ein **ausgewogener Ansatz** ist von Nöten, der beide Ideologien vereint: ein **klimafreundliches Leben**, dass **neben der Dekarbonisierung** auch **soziale und Verteilungseffekte berücksichtigt** und Lösungen aufzeigt
- Im interdisziplinären ACRP-Projekt haben Q2-Pathways haben wir versucht, solche Lösungsansätze zu entwickeln: **Qualitative Transformationspfade** ► **Quantitative Energiesystem- und makroökonomische Analysen**

Blick aufs Energiesystem:

- **Dekarbonisierung impliziert eine massive Steigerung der effizienten Nutzung von Energie UND des Stromverbrauchs** - dem müssen wir mit einem **beschleunigten Ausbau erneuerbarer Energien begegnen**
- Hierbei stoßen wir auf **Grenzen der Umsetzbarkeit**, wenn nicht gleichermaßen Energieeffizienz gesteigert wird, also **Energie maßvoll genutzt** wird.
- **Modelling-to-Generate-Alternatives (MGA)** hilft hier **alternative Entwicklungspfade** auf der Erzeugungsseite zu entwickeln, die nicht rein auf (System)Kosteneffizienz beruhen und auch **andere Realitäten berücksichtigen**.
- **MGA** bietet der Politik **Handlungsspielräume**: *Darf es mehr PV oder Wind oder Speicher sein?*

Modelling-to-Generate-Alternatives (MGA)

als innovativer Ansatz zur

Quantifizierung qualitativer Transformationspfade
zu einem klimafreundlichen Leben

Vielen Dank für
Ihre Aufmerksamkeit!

Kontakt: gustav.resch@ait.ac.at