



BOKU
UNIVERSITY

BOKU Energiecluster / IG Windkraft – Veranstaltung
am 28. April 2026

naturimaufwind 

Transformation des Energiesystems – Was funktioniert und wo müssen wir hin?

Tobias Pröll

BOKU University, Institut für Verfahrens- und Energietechnik
tobias.proell@boku.ac.at

Einstieg

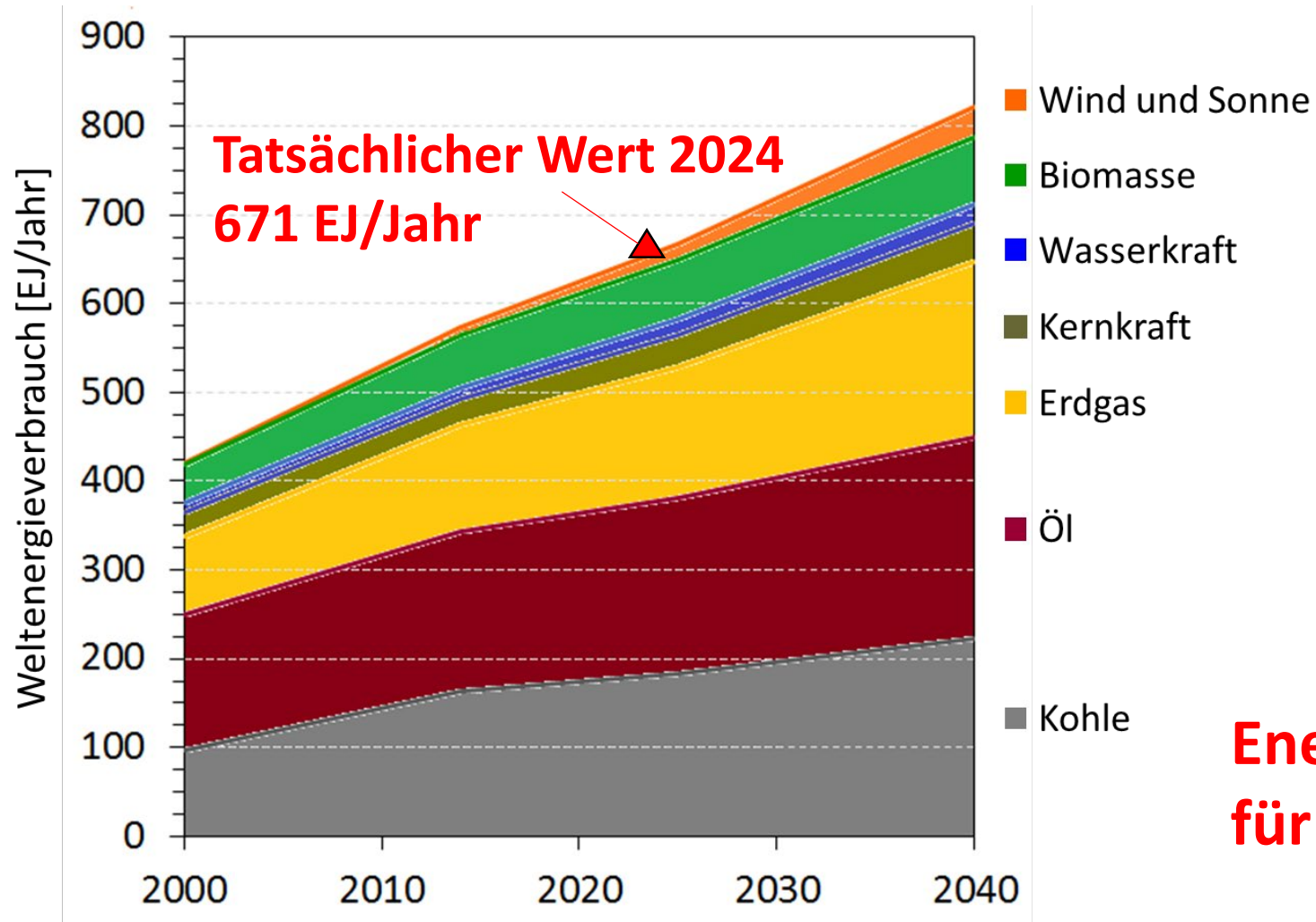
Ein auf fossilen Energieträgern basierendes Energiesystem...

- ist die Hauptursache katastrophaler Klimaveränderungen und
- macht von Energie-Importen abhängig.

Wie da herauskommen?

- Heiße Luft vermeiden
- Quantifizierte, wirtschaftlich realistische Ansätze
- No-regret Maßnahmen zuerst

Technischer Energiebedarf weltweit



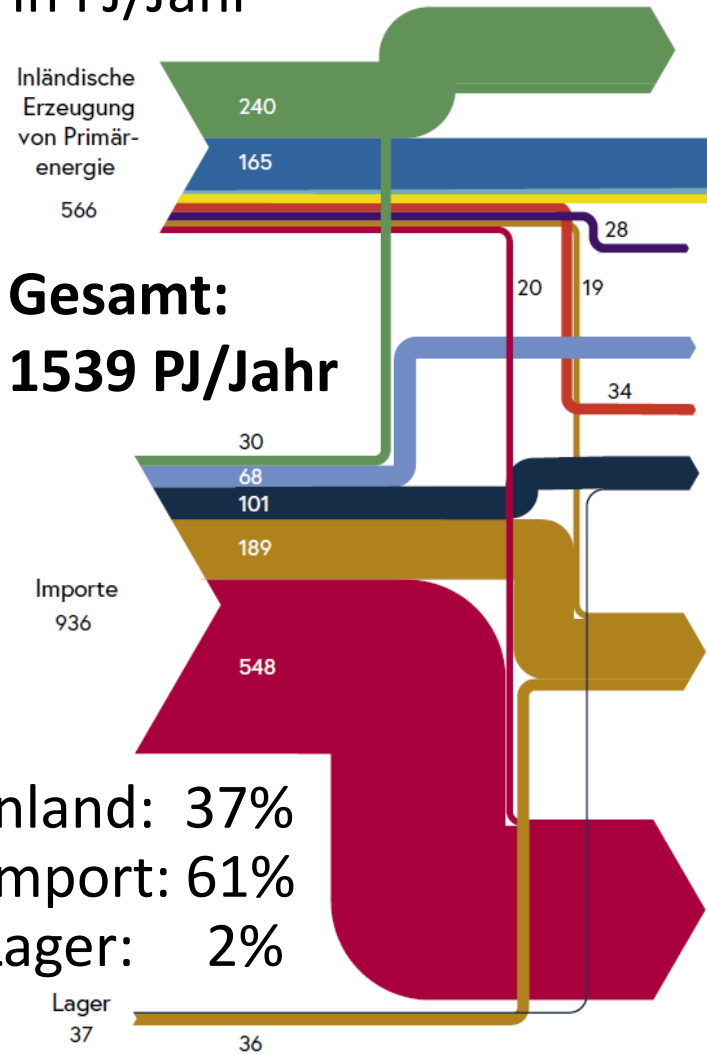
- **Global: >80% Fossil** (seit 30 Jahren unverändert!)
- Energiebedarf steigt schneller als Ausbau der Erneuerbaren

Energieversorgung entscheidend für wirtschaftliche Entwicklung!

[IEA World Energy Outlook 2016 – iea.org; OurWorldInData.org 2026]

Status Quo Energie in Österreich – Energieaufkommen '24

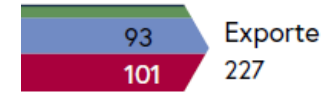
in PJ/Jahr



- Biomasse: 17.5%
- Wasserkraft: 10.7%
- Wind: 2.1%, PV: 1.8%
- Müll: 1.8%
- Stromimport: 4.4%
- Umgebungswärme: 2.2%
- Kohle: 6.6%
- Erdgas: 15.9%
- Erdöl: 36.9%

1 PJ = 3.6 TWh

Abzüglich Exporte 227 PJ/Jahr



Ergibt **Brutto-Inlandsverbrauch BIV von 1312 PJ/Jahr.**

Energieaufkommen Österreich

60% fossil

40% erneuerbar

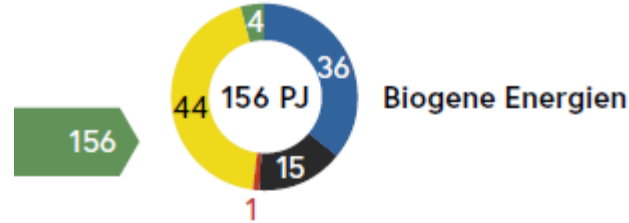
→ Wie kommen wir von den 60% weg?

[Energieflussbild Österreich 2024 – Austrian Energy Agency, Statistik Austria]

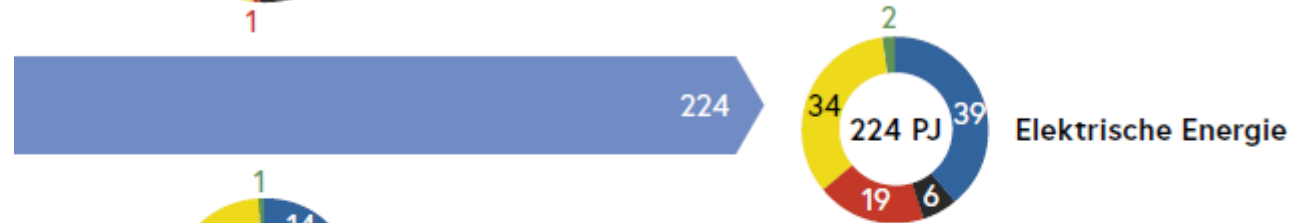
Wofür verwenden wir die Energie – Endenergieeinsatz '24

in PJ/Jahr

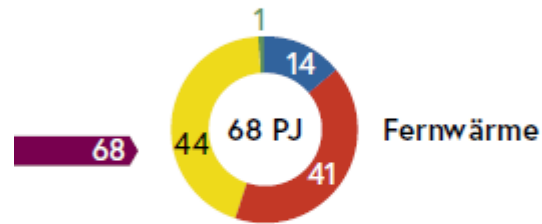
Biomasse: 156 PJ



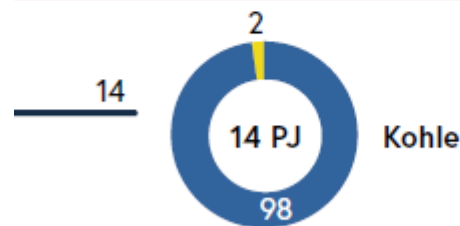
Strom: 224 PJ



Fernwärme: 68 PJ



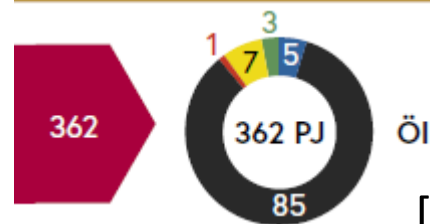
Kohle: 14 PJ



Erdgas: 160 PJ



Erdöl: 362 PJ



- Produzierender Bereich
- Verkehr
- Dienstleistungen
- Private Haushalte
- Landwirtschaft

EEV gesamt:
1044 PJ/Jahr

Größte Transformationspotenziale:

- Erdöl im Verkehr 308 PJ
- Gas und Heizöl in Gebäuden 93 PJ
- Erdgas in der Produktion 96 PJ

[Austrian Energy Agency, Statistik Austria]

Erdöl im Verkehrssektor

Derzeit **308 PJ/Jahr fossile Kraftstoffe** plus 24 PJ/Jahr Biokraftstoffe = 332 PJ/Jahr gesamt

Annahmen: Umstellung aller Verbrennungsmotoren auf **elektrische Antriebe**

Gleiche Anzahl Fahrzeuge, kein Rebound, keine Suffizienzannahme

Wirkungsgrad-Vorteile: Elektrisch 80% versus Verbrenner-Antrieb 30%

Gleichbleibender Strommix: 182 kg CO_{2e}/MWh_{el} (Verbrauchsmix)

Parameter	Status Quo	Nachher	Veränderung
Erdöl im Endverbrauch Ö	362 PJ/a	54 PJ/a	- 85%
Elektrischer Endverbrauch Ö	224 PJ/a	349 PJ/a	+ 56%
Treibhausgasausstoß* Verkehr	27.4 Mt/a	6.3 Mt/a	- 77%
Endenergieverbrauch gesamt Ö	1044 PJ/a	861 PJ/a	- 18%

*) Inklusive indirekte Emissionen der Energieträger: Kraftstoff \approx 320 kg CO_{2e}/MWh_{Hu}

[CO_{2e}-Monitor UBA: secure.umweltbundesamt.at/co2mon/co2mon.html]

Heizöl und Erdgas im Gebäudebereich (Heizung und WW)

29 PJ/Jahr Heizöl sowie 64 PJ/Jahr Erdgas in Haushalten und im Dienstleistungssektor

Annahme: Umstellung aller fossilen Heizkessel **auf Wärmepumpen**

Wirkungsgrad-Vorteile: Wärmepumpe Arbeitszahl 3 vs. Kessel-WG 95%

Gleichbleibender Strommix: 182 kg CO_{2e}/MWh_{el}

Parameter	Status Quo	Nachher	Veränderung
Erdöl im Endverbrauch	362 PJ/a	333 PJ/a	- 8%
Erdgas im Endverbrauch	160 PJ/a	96 PJ/a	- 40%
Elektrischer Endverbrauch	224 PJ/a	253 PJ/a	+ 13%
Treibhausgasausstoß* Heizung	7.2 Mt/a	1.5 Mt/a	- 80%
Endenergieverbrauch gesamt Ö	1044 PJ/a	980 PJ/a	- 9%

*) Inklusive indirekte Emissionen: Heizöl $\approx 340 \text{ kgCO}_{2e}/\text{MWh}_{\text{Hu}}$; Erdgas $\approx 250 \text{ kgCO}_{2e}/\text{MWh}_{\text{Hu}}$

Fossile in der Produktion / Industrie (Prozesswärme)

Unterschiedliche Optionen hauptsächlich abhängig vom Temperaturniveau:

- Niedertemperaturwärme bis 60°C: Wärmepumpen von Umgebungswärme
- Mittlere Temperaturen bis 160°C: Aktive Wärmerückgewinnung und Bioenergie
- Hochtemperaturbereich über 160°C: Bioenergie, erneuerbare Gase sowie fossile Energie mit CO₂ Abscheidung und Speicherung (CCS)

Quantifizierung der Bereiche schwierig, dzt. **128 PJ/a fossiler EEV in der Produktion**

(14 PJ/a Kohle, 18 PJ/a Öl und 96 PJ/a Erdgas)

Wirtschaftlichkeit der Ersatzlösung in der Produktion **zentrales Erfordernis**

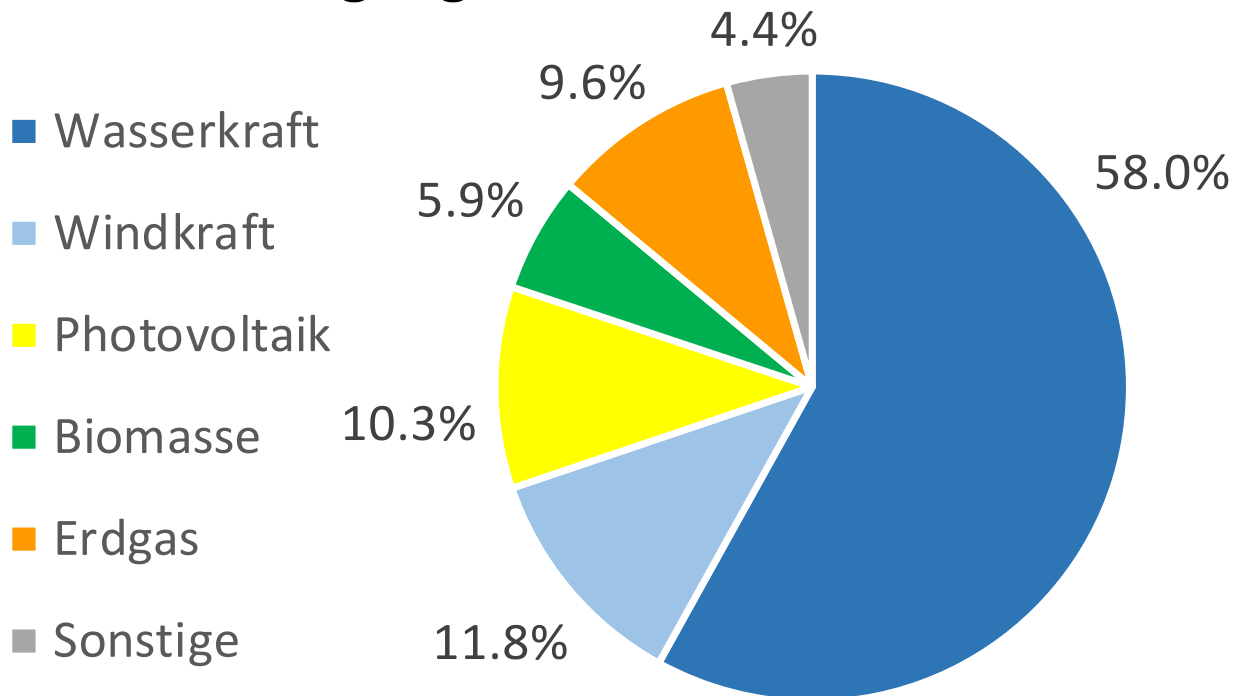
Möglichkeiten (gereiht nach Wirtschaftlichkeit): Wärmepumpen, Biobrennstoffe (z.B. 24 PJ/a aus dem elektrifizierten Verkehrssektor), direkte elektrische Heizung (Hochtemperatur), biogene Gase, CCS, chemisch gespeicherter Überschuss-Strom

Gesamtergebnis erneuerbares Energiesystem

- Vollständige Elektrifizierung des Mobilitätssektors
- Elektrifizierung der (fossilen) Gebäudeheizungen
- Elektrifizierung der (Industrie)produktion
- **Summe**

+ 56% Elektrische Energie
+ 13% Elektrische Energie
+ 50% Elektrische Energie
+ 120% Elektrischer Bedarf

Inländ. El. Erzeugung 2024: 283 PJ



2024: 224 PJ/a el. Endverbrauch
283 PJ/a inländ. Erzeugung
davon 86% erneuerbar

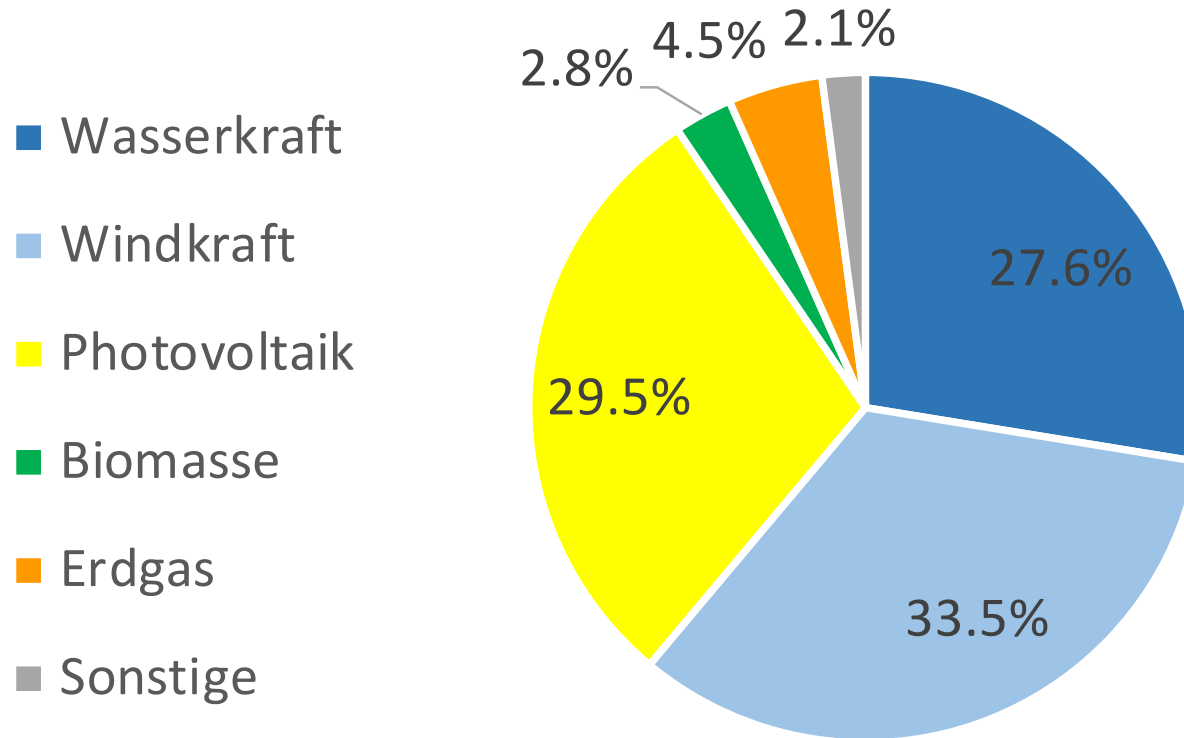
Nach Umbau d. Energiesystems:
500 PJ/a el. Endverbrauch
600 PJ/a inländ. Erzeugung
Ziel: 100% erneuerbar

Nur Wind und PV mit Wachstum
→ je x6 bei Wind und PV

Zukünftiges elektrisches Energiesystem

Inländ. el. Erzeugung: 600 PJ/a

(Wind und PV wachsen x6, Rest bleibt gleich)



→ Wind und PV erreichen heutige Jahrerzeugung der Wasserkraft.

Herausforderungen:

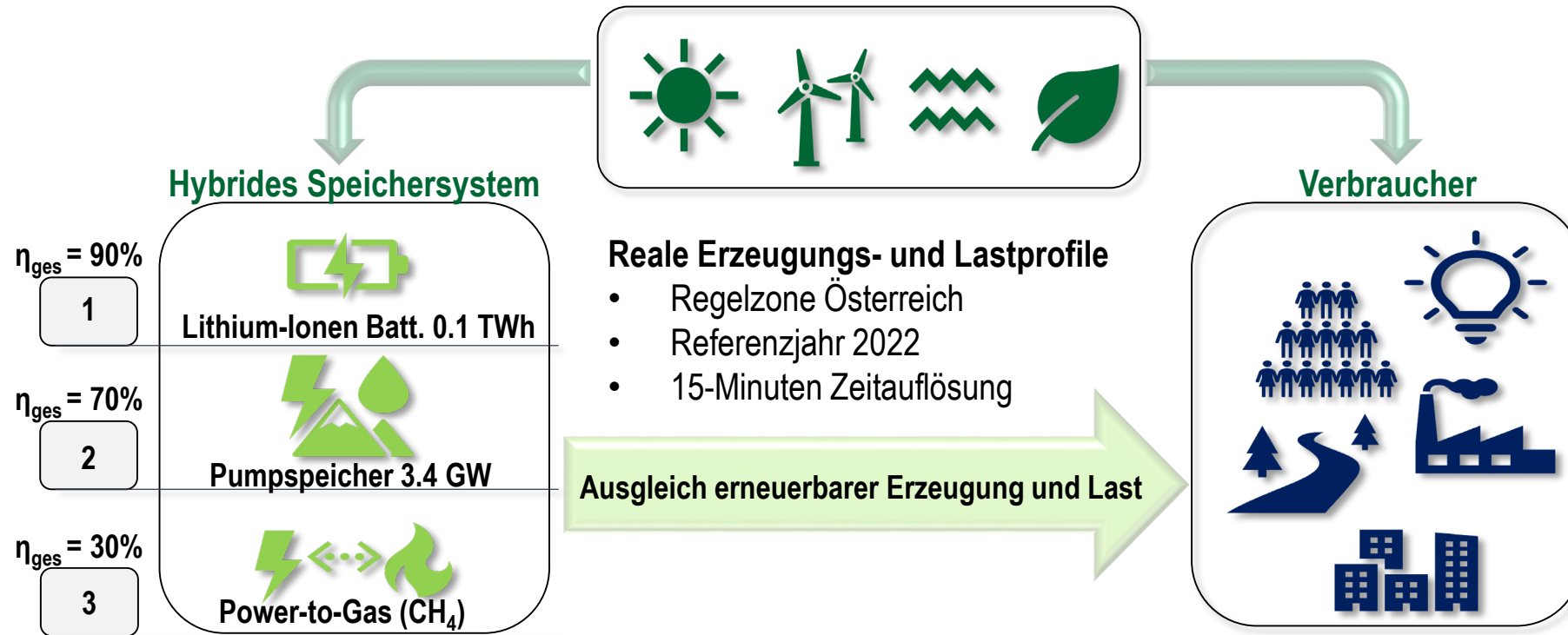
- Intermittierende Erzeugung bei Wind und PV, Saisonalität bei PV!
- Flächenbedarf und regionale Verteilung der Potenziale
- Finanzierung der Infrastruktur und Business-Cases im Marktmodell

Lösungsansätze:

- Hybride Speicherkonzepte
- Bedarfsgerechter Netzausbau
- Rahmenbedingungen für Produkte mit verschwindenden Grenzkosten

Hybrides Speicherkonzept für Österreich

- Reale Erzeugungs- und Verbrauchsdaten der österreichischen Regelzone (2022)
- 100% erneuerbare Erzeugung, ohne Import und Export (Wind und PV aufskaliert)
- Hybrides Speicherkonzept mit Priorisierung nach zyklischer Effizienz



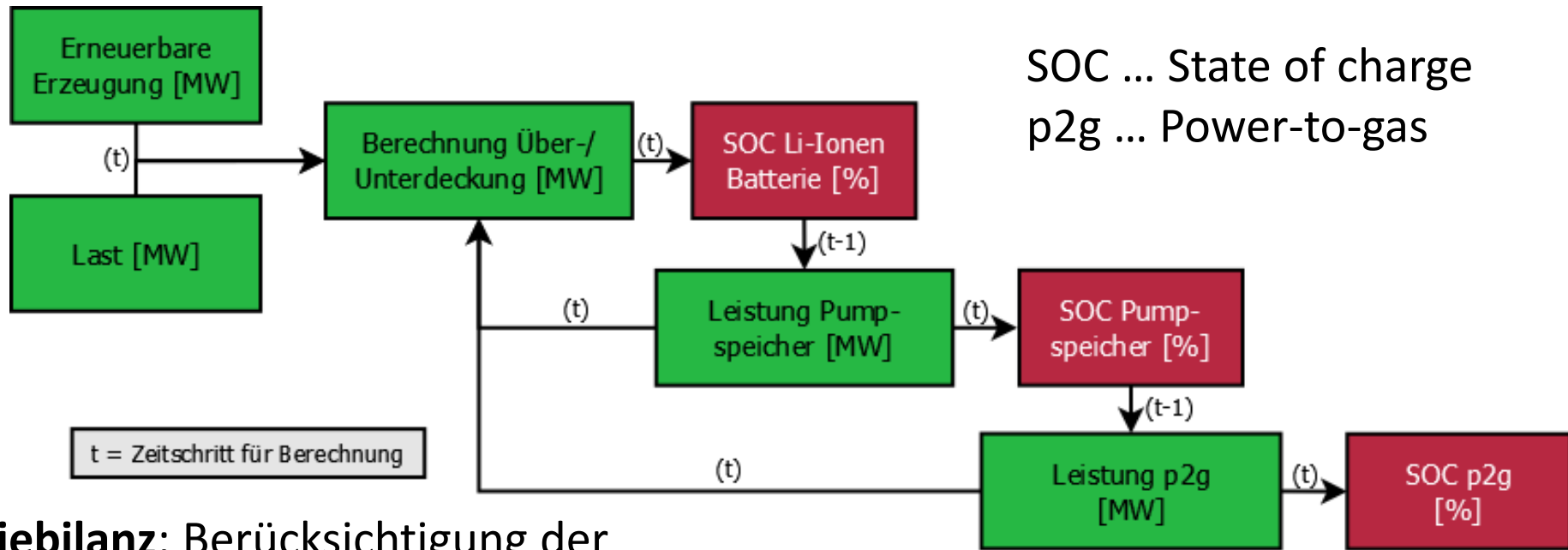
[Mensik, J., Wöss, D.,
Pröll, T., EnInnov, 2024]

→ Lastausgleich und Speicherfüllstände in 15-min Auflösung für ein Jahr

Speicherallokationsprinzip

Zielsetzung: transparenter Algorithmus für einfache Adaption und rasche Szenarienbewertung.

Lade-/Entladeleistung
resultiert aus dem errechneten Überschuss/der Unterdeckung

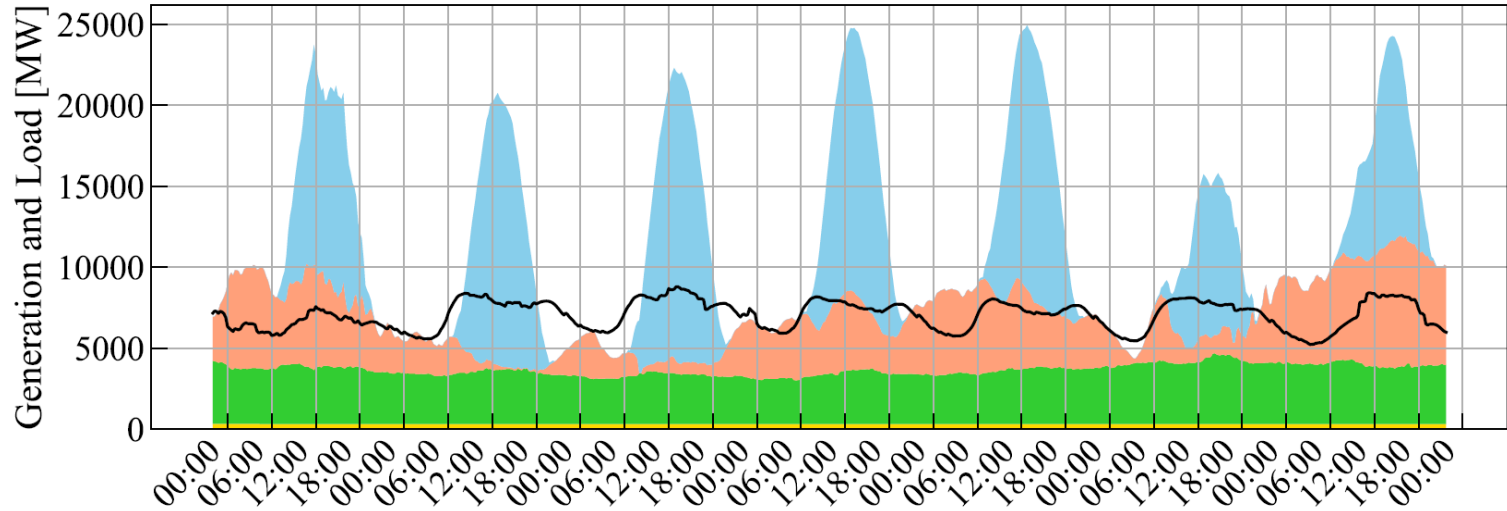


Erhalt der Energiebilanz: Berücksichtigung der einzelnen Leistungsflüsse bei Über-/Unterdeckung

- Primärer Lastausgleich durch Batteriespeicher
- Pump-/Turbinenleistung als Funktion des Batteriespeicherfüllstandes
- Elektrolyse-/Kombikraftwerksleistung als Funktion des Pumpspeicherfüllstandes

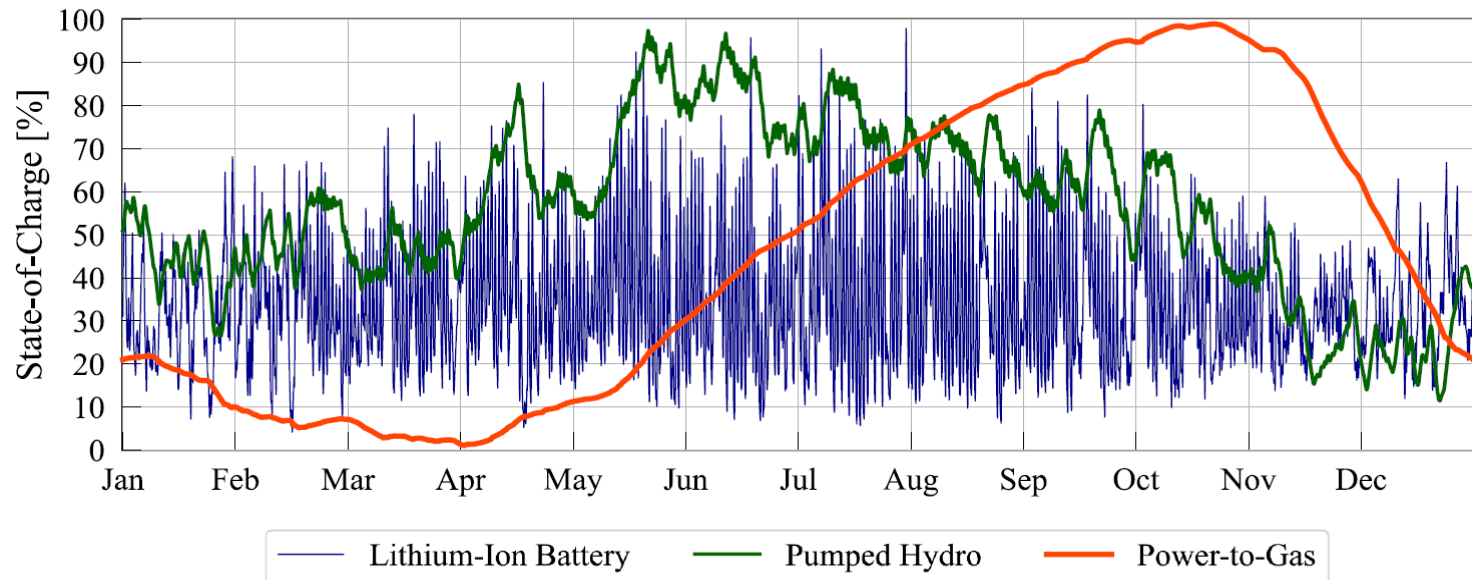
[Stubner, H., Masterarbeit, BOKU, 2023]

Ergebnis – Lastverlauf und Speicherfüllstände



Lastverlauf Woche (April 2022)

—	Load	→ 223 PJ/a (2022)
■	PV_factored	→ 105 PJ/a (x 30)
■	Wind_factored	→ 72 PJ/a (x 2.8)
■	Run of River	→ 87 PJ/a (x 1)
■	Biomass	→ 9 PJ/a (x 1)



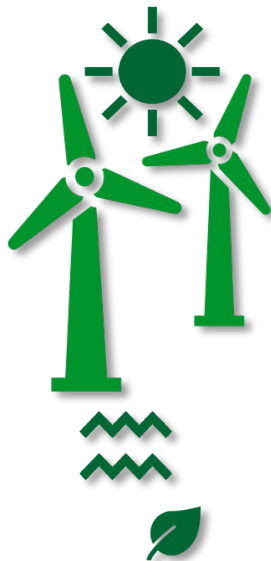
- Batterie fängt kurzfristige Schwankungen ab
- Pumpspeicher wirkt mittelfristig
- Chemischer Speicher für saisonalen Ausgleich

[Mensik, J., et al., 2024, Journal of Energy Storage, 110996.]

Szenarien für Erneuerbaren-Ausbau: Wind vs. PV

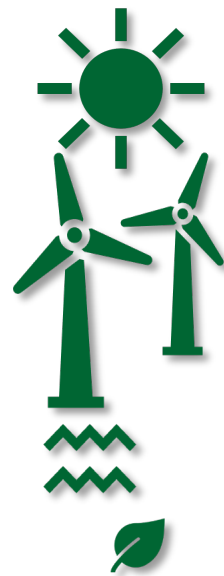
- 100% erneuerbare Stromerzeugung zu jeder Viertelstunde des Jahres
- Deckung der Nachfrage in Kombination mit dem hybriden Speichersystem
- Nur Wind und/oder Photovoltaik (PV) wachsen, Wasserkraft und Biomasse auf Niveau 2022

Szenario 1



Szenario 1: max. Erhöhung der Winderzeugung (PV, Biomasse, Laufwasserkraft entsprechen IST-2022)

Szenario 2



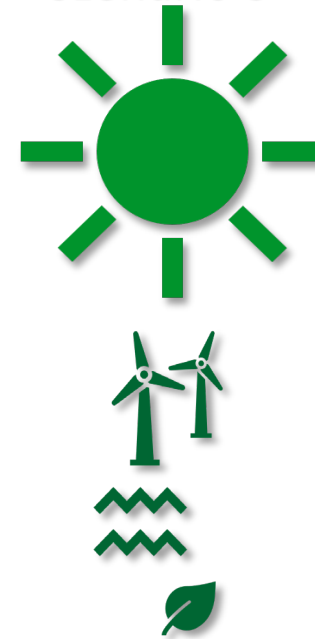
Szenario 3



Szenario 4



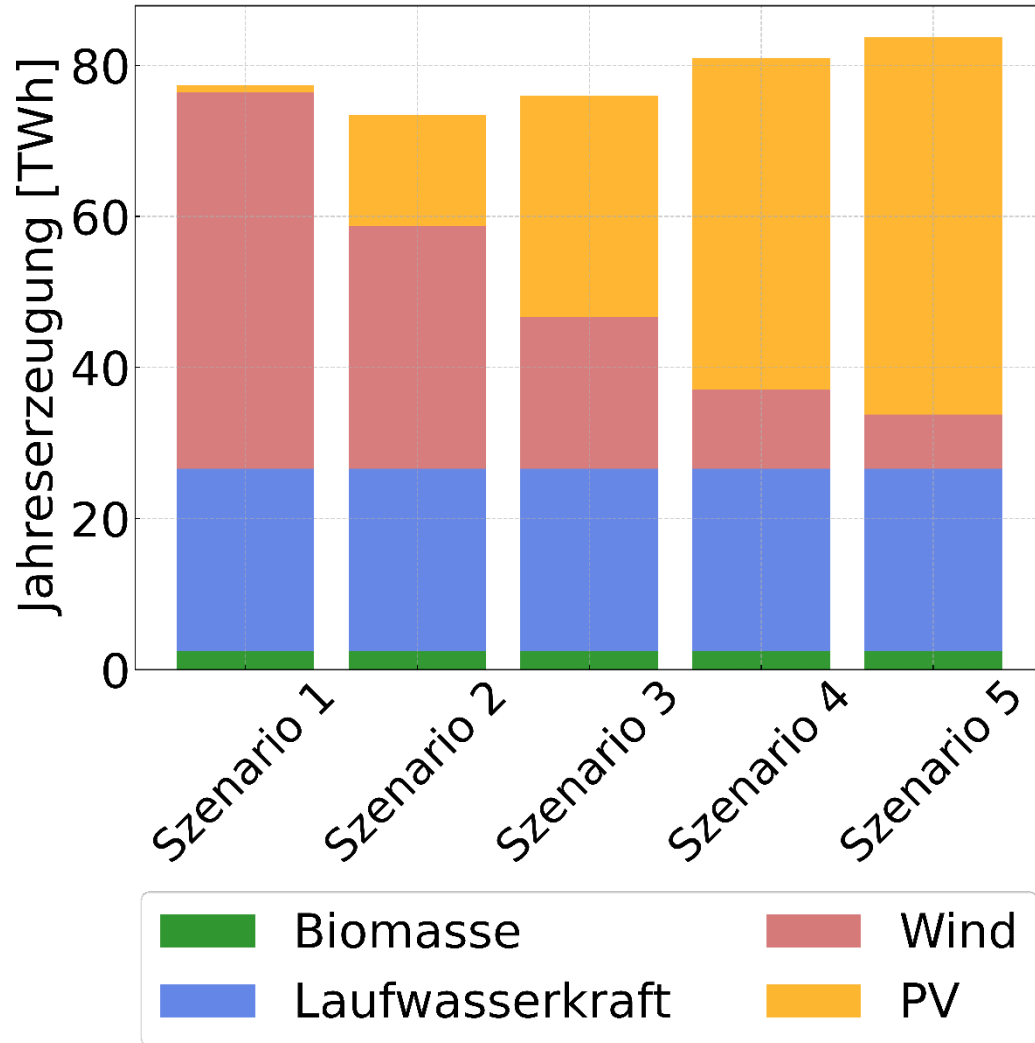
Szenario 5



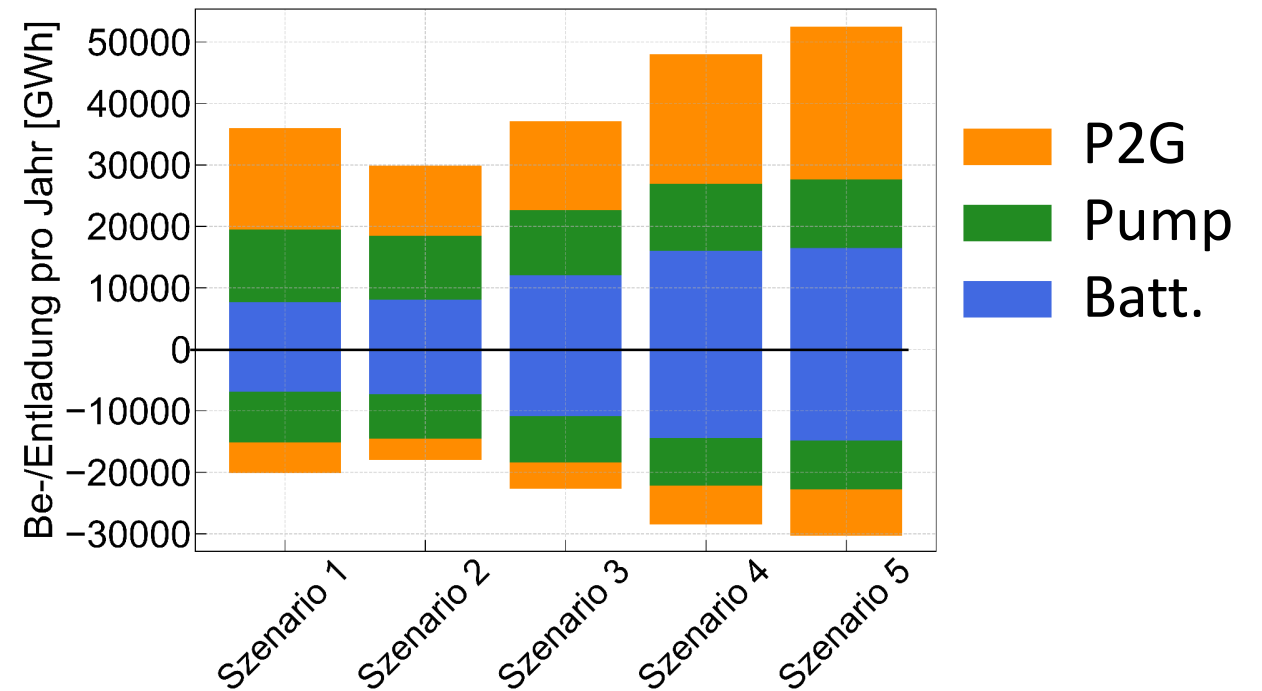
Szenario 5: max. Erhöhung der Photovoltaik-erzeugung (Wind, Biomasse, Laufwasserkraft entsprechen IST-2022)

[Mensik, J., Dissertation, BOKU, 2025]

Szenarien für Erneuerbaren-Ausbau: Wind versus PV



Basisjahr: 2022	SZ 1	SZ 2	SZ 3	SZ 4	SZ 5
Ausbau-Faktor Wind	6.9	4.5	2.8	1.5	1.0
Ausbau-Faktor PV	1.0	15	30	45	51



[Mensik, J., Dissertation, BOKU, 2025]

Fazit Speicherstudie Österreich 100% erneuerbar

- Annahme 100 GWh Batteriekapazität (2 Mio. E-PKW), Pumpspeicher wie vorhanden
- Elektrolysekapazität bis 12 GW wie wirtschaftlich machbar, Rückverstromung mit vorhandener Erdgas-Kombi-KWK Infrastruktur möglich
- Priorisierte Be- und Entladereihenfolge auf Basis der zyklischen Effizienz
→ Optimierte Energie- (und Kosten-?)Effizienz
- Geringster Speicheraufwand bei Erzeugermix **Wind : PV \approx 2 : 1** (Szenario 2)
→ Grund: geringere Saisonalität von Wind
- Keine Netzlimitierungen hinterlegt
- Kommunikationsinfrastruktur für dezentralisiertes Batteriespeicher-Management
- Sinnvolle no-regret Lösung auch im Teilausbau (z.B. ohne Elektrolyse)
- Bei zunehmendem Strombedarf wächst auch der Speicherbedarf proportional

Zum Mitnehmen

- Klimakrise = Energiekrise
- Klimaneutralität über Elektrifizierung erreichbar
- Wachstumstechnologien Wind und Photovoltaik
- Netz wird Schwamm – dezentrale Speicherung
- Infrastruktur ist staatliche Planungsaufgabe.
- Märkte brauchen sinnvolle Rahmenbedingungen.
- Wer früh reagiert, fährt nachhaltig besser.

Kritik/Diskussion: E-Mail an tobias.proell@boku.ac.at