



Europäischer Fonds für regionale Entwicklung (EFRE)  
Der Oberrhein wächst zusammen mit jedem Projekt

# Energiesystemmodellierung: Szenarien, Technologien, Transformationspfade - RES-TMO



Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU), KIT

Joris Dehler-Holland, Ümitcan Yilmaz, Phuong Minh Khuong

Laboratoire image, ville, environnement (LIVE), UNISTRA

Nadège Blond (CNRS), Marco Guevara (CNRS), Adrien Bart (CNRS), Alain Clappier (UniStra)



# Inhalt

---

Einleitung

Vorstellung der verwendeten Modelle und Szenarioannahmen

Ergebnisse

- Entwicklungspfade für Erneuerbare und Speicher
- Sensitivitätsanalysen
- Detaillierte Analyse der Oberrheinregion

Schlussfolgerungen

# Einleitung

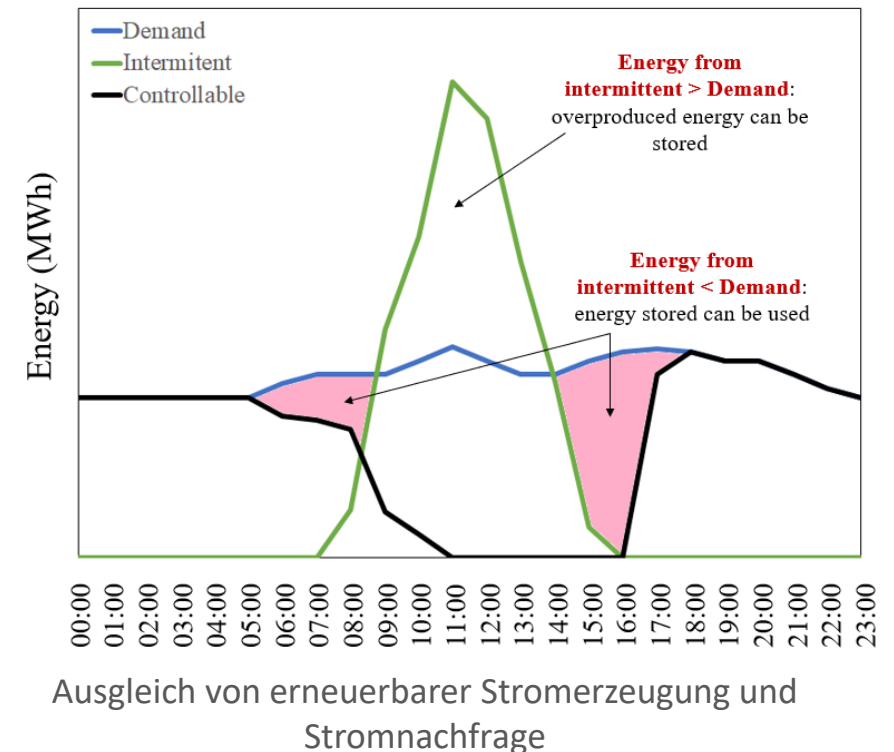
Zur Dekarbonisierung des Stromsystems sind **weitreichende Transformationen des Energiesystems notwendig** (Anteil von EE 2019: 23% in Frankreich und 42% in Deutschland)

**Regionen** können zur Zielerreichung beitragen

Große **regionale Potentiale erneuerbarer Energien in der Oberrheinregion verfügbar** (AP 2)

**Welche Technologien eignen sich besonders**, um die Oberrheinregion zu dekarbonisieren?

**Wie können Technologien kombiniert werden**, um Ziele „möglichst gut“ zu erreichen?

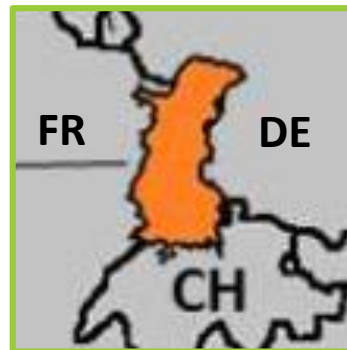


# Zwei Energiesystemmodelle

Im Projekt RES-TMO werden verschiedene Perspektiven des Energiesystems der ORR eingenommen:

- **Regionale Perspektive:** Wie können regionale Erneuerbare genutzt werden, um die regionale Nachfrage auszugleichen?
- **Europäische Integration:** Welchen Rolle spielt die Vernetzung des Europäischen Stromsystems, um die Nachfrage in ORR nachhaltig und kosteneffizient zu decken?

Dazu wurden im Projekt RES-TMO **zwei Energiesystemmodelle** entwickelt



REPM



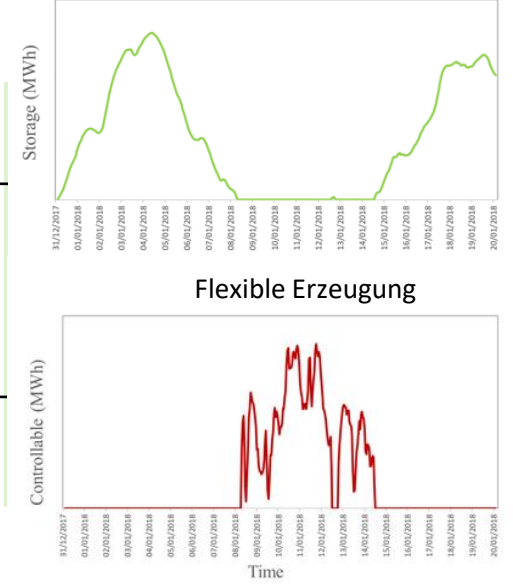
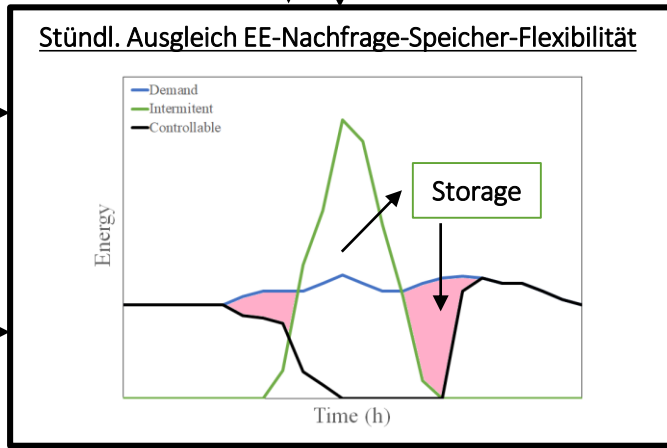
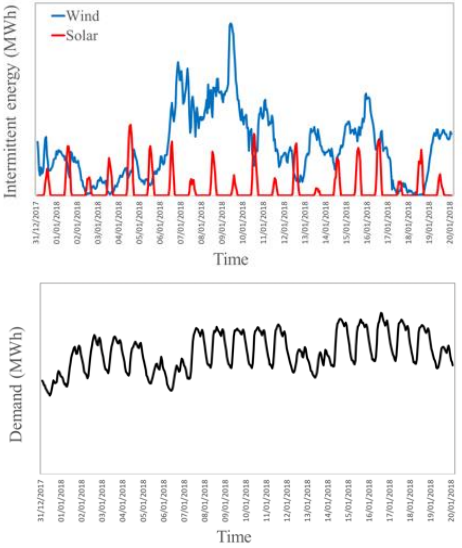
PERSEUS-EU

Mögliche Szenarien  
% Solar/Wind Repartition  
% der Nachfrage erzeugt durch Erneuerbare

(Regionale) Einschränkungen:  
z.B. verfügbare Fläche,  
Akzeptanz,  
Politikmaßnahmen, oder  
Netzverluste



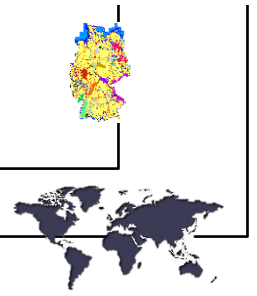
Speicher



Technologiewahl  
Kosten

Konventionelle flexible Erzeugung

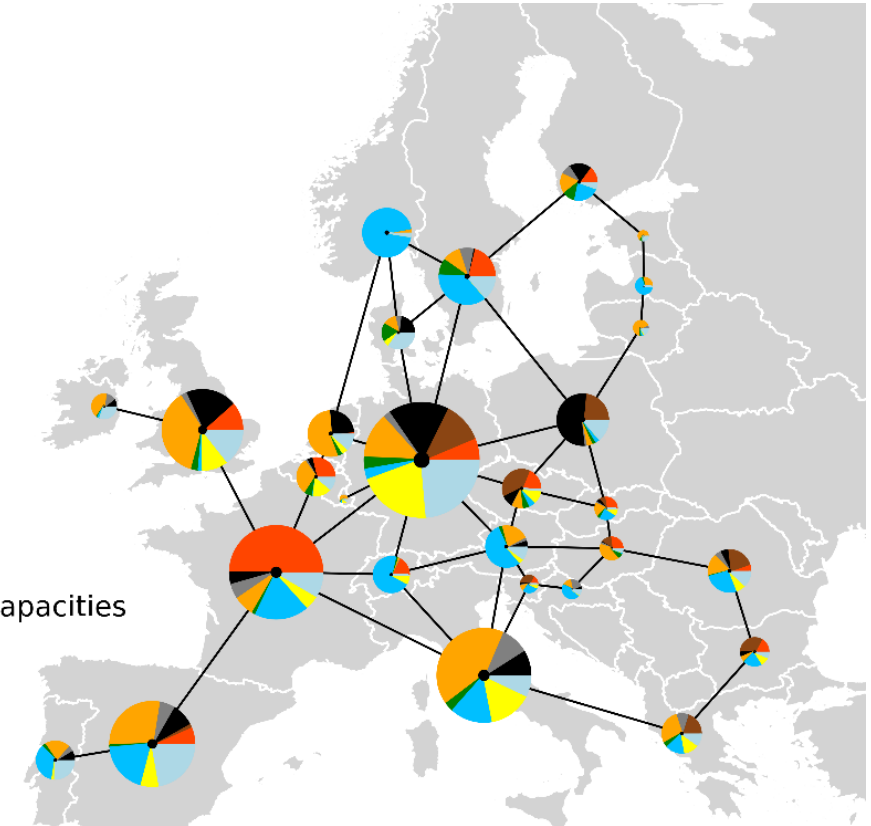
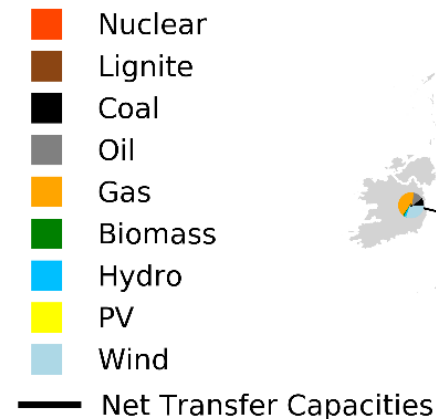
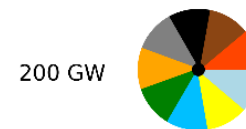
Ausgleich durch Stromtausch mit Nachbarn



# Modelle – PERSEUS\*-EU

- EU-27 ohne Malta und Zypern, mit GB, NO, CH
- Modell zur **langfristigen Optimierung des europäischen Energiesystems**
- **Zielfunktion:** Minimierung der Systemausgaben unter technischen, ökologischen und politischen Restriktionen
- Abbildung des bestehenden Kraftwerkparks
- Modellendogene Berücksichtigung von **Pumpspeichern, Großbatterien und Power-to-Gas**
- Integration der **Oberrheinregion als eigenständige Knoten im Modell**

PERSEUS-EU

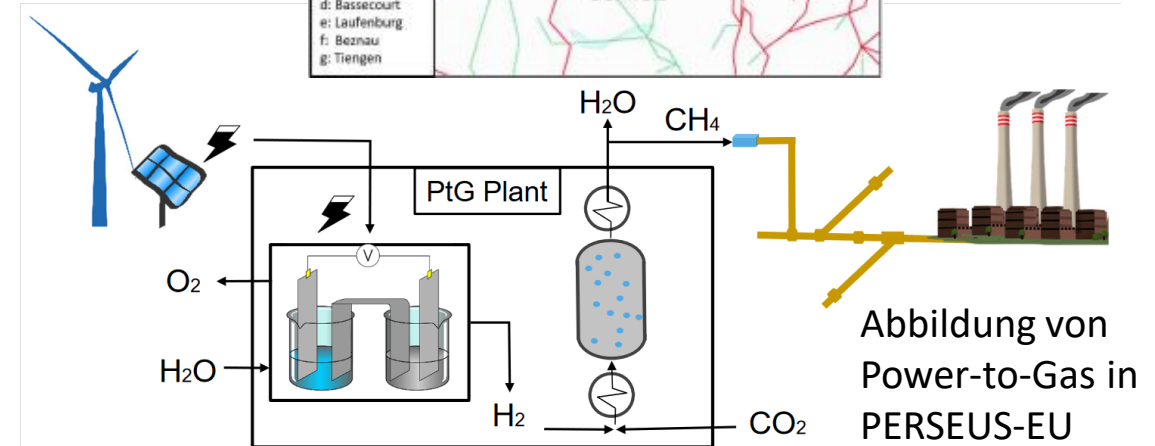
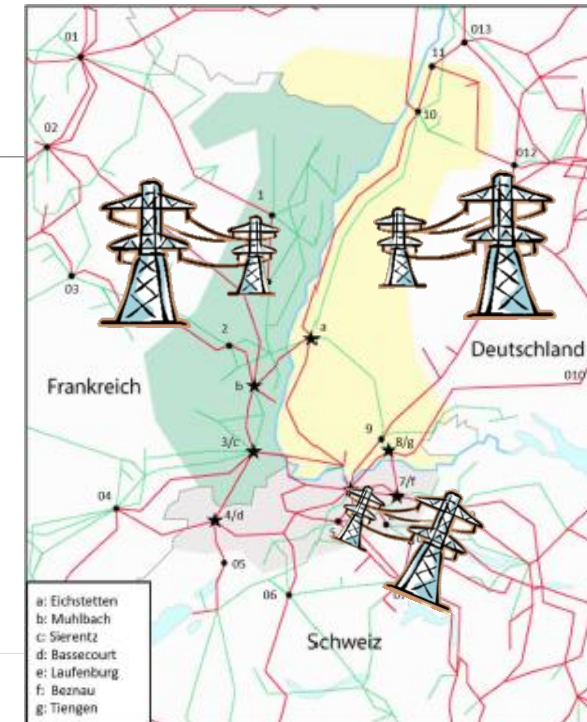


\* Program Package for Emission Reduction Strategies in Energy Use and Supply

# Szenarioannahmen

- **Szenariohorizont:** 2020-2050 (in 10-Jahres-Schritten)
- CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreise steigen auf 170€/t bis 2050
- Kein Neubau von Kohlekraftwerken
- **Zielvorgabe:** Dekarbonisierung des europäischen Elektrizitätssystems bis 2050
- Zunahme der Elektrizitätsnachfrage anhand des EU-Referenzszenarios
- **Übertragungsnetzausbau:**
  - TYNDP 2020
  - **Variation zwischen 0% und 70%** der thermischen Kapazitäten entlang der Grenzen der Oberrheinregion

PERSEUS-EU

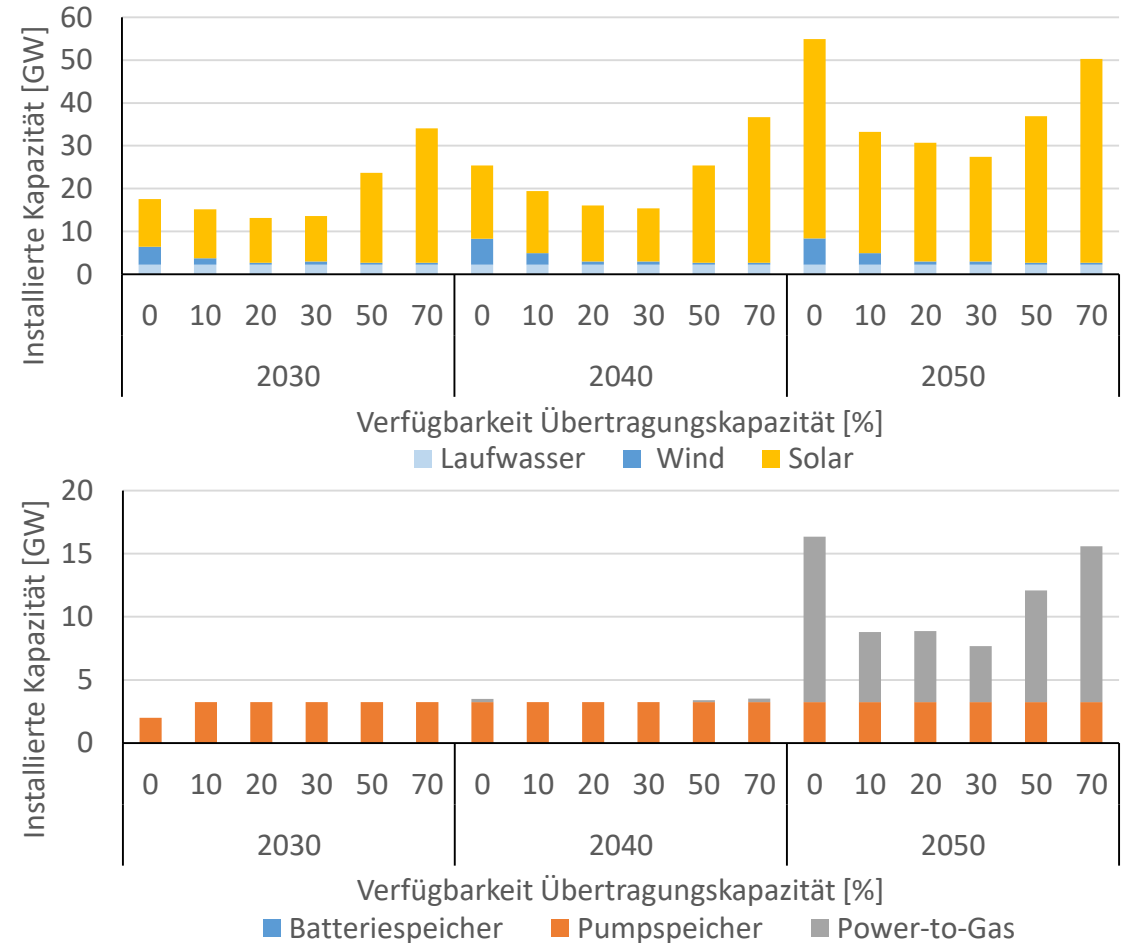


# Ergebnisse

Installierte Kapazitäten von Erneuerbaren und Speichern in der Oberrheinregion (2030 – 2050):

- Unter allen Übertragungsnetzannahmen spielt **Solarenergie die wichtigste Rolle** (24-47GW)
- **Windenergie nur unter Autarkieannahmen** in der Lösung (344MW – 6,1GW)
- Windenergiestandorte außerhalb der ORR bieten höhere Erträge
- Speicherausbau von **Power-to-Gas proportional zum Ausbau von Solarenergie**

PERSEUS-EU





# Sensitivitäten

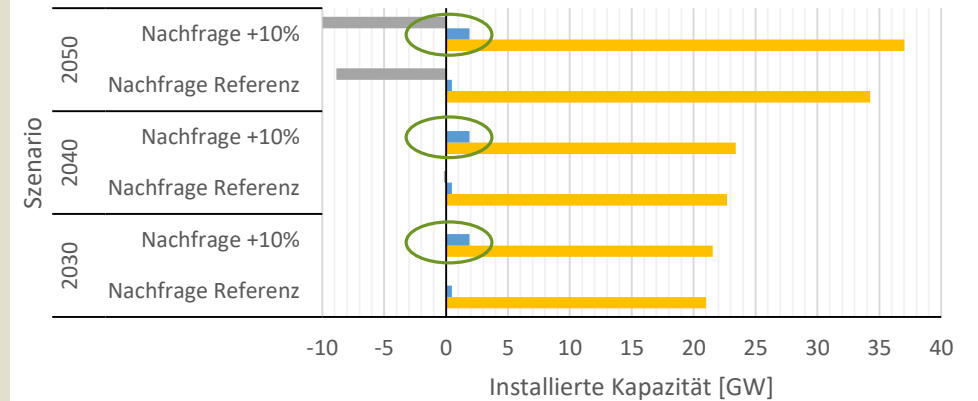
Zusätzlich wurde die Sensitivität der Modellergebnisse auf wichtige Rahmenparameter untersucht:

- Erhöhte Stromnachfrage in Europa, z.B. durch erhöhte Durchdringung mit E-Pkw, grünem Wasserstoff oder Wärmepumpen
- Entwicklung der Kosten von Power-to-Gas

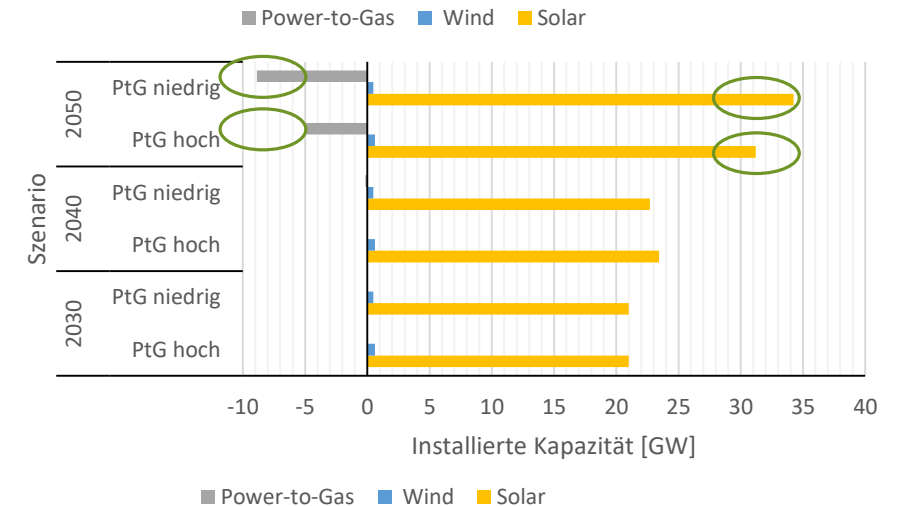
Ergebnisse zeigen...

- zunehmende Installationen von PtG und Solarenergie, **aber auch Windenergie bei erhöhter Stromnachfrage**
- geringeren Ausbau von Solarenergie in PtG** im Falle erhöhter Kosten von PtG

## Erhöhte Nachfrage



## PtG-Kostenentwicklung



# REPM Ergebnisse

## Analyse des Energiesystems der Oberrheinregion

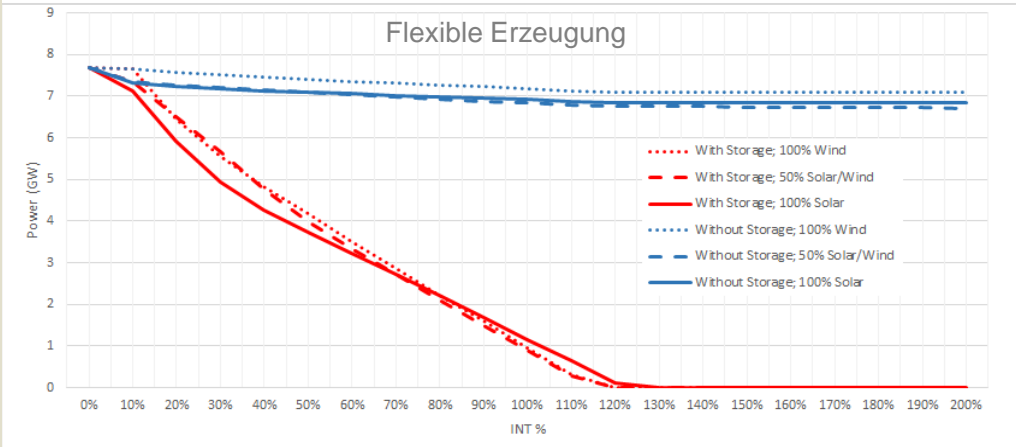
- Einsatz des REPM-Modells
- Variation des Anteils an der Erzeugung aus Wind und Solar zwischen 0%-200%

## Ergebnisse

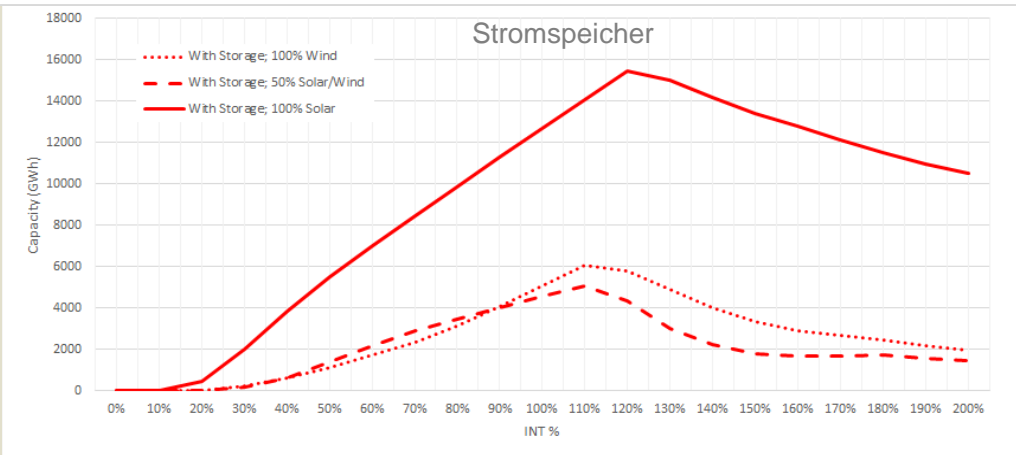
- Es besteht ein wesentlicher Bedarf für flexible Erzeugung (Importe, Speicher, fossile Brennstoffe)
- Mit der Hilfe von Stromspeichern kann der Bedarf für andere flexible Erzeugung auf Null gesenkt werden
- Windenergie reduziert den Bedarf für Speicher

REPM

Bedarf flexible Erzeugung



Bedarf für Speicher



# Schlussfolgerungen

---

- Ergebnisse deuten an, dass **Solarenergie wichtigste Quelle von Elektrizität in der Oberrheinregion** darstellen könnte
- Windstandorte außerhalb der Region bieten höhere Erträge
- **Bedarf vor allem für Speichertechnologien, die Strom langfristig speichern** – vorhandene Pumpspeicher eignen sich um Strom kurzfristig zu speichern
- **Windenergie kann den Speicherbedarf verringern** und ist wichtig, wenn hohe Autarkie der Region angestrebt wird
- Ergebnisse unterliegen Unsicherheiten bzgl. wesentlicher Rahmenbedingungen, z.B. der Entwicklung der Stromnachfrage oder von Technologiekosten
- Weiterer Forschungsbedarf besteht für die Oberrheinregion insbesondere in der multidisziplinären **Erforschung der Geothermie-Potentiale**



Danke für die  
Aufmerksamkeit!

<https://www.res-tmo.com/>

Contacts:



Joris Dehler-Holland  
Head of Energy Policy Group KIT-DFIU/IIP, Karlsruhe  
[joris.dehler@kit.edu](mailto:joris.dehler@kit.edu)

Prof. Dr. Alain Clappier  
Head of the EPAC team, LIVE, UNISTRA, Strasbourg  
[alain.clappier@live-cnrs.unistra.fr](mailto:alain.clappier@live-cnrs.unistra.fr)

Ines Gavrilut  
Project Manager  
[ines.gavrilut@felis.uni-freiburg.de](mailto:ines.gavrilut@felis.uni-freiburg.de)



Europäischer Fonds für regionale Entwicklung (EFRE)  
Der Oberrhein wächst zusammen mit jedem Projekt

# Project Consortium & Overview



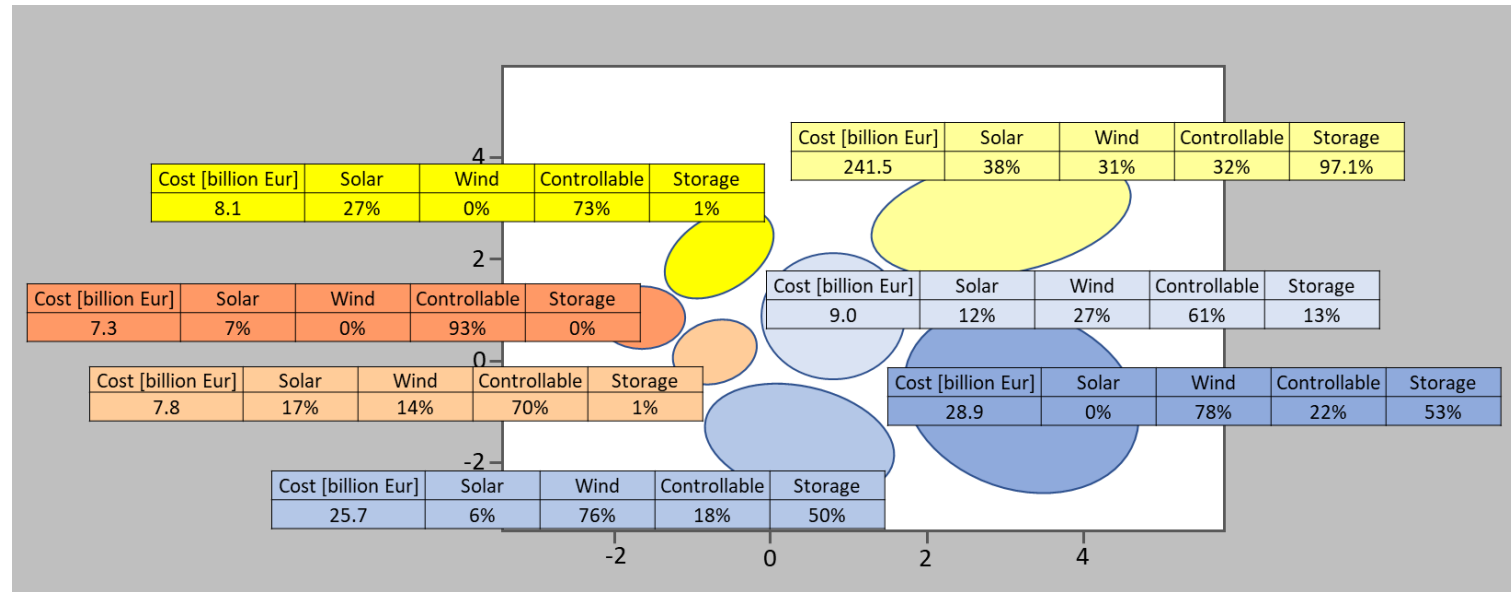
1.02.2019 – 31.01.2022

- ERDF co-funding: 1.695.471 €
- Cross-border, interdisciplinary, representative
- 15 partners from science, industry and public authorities

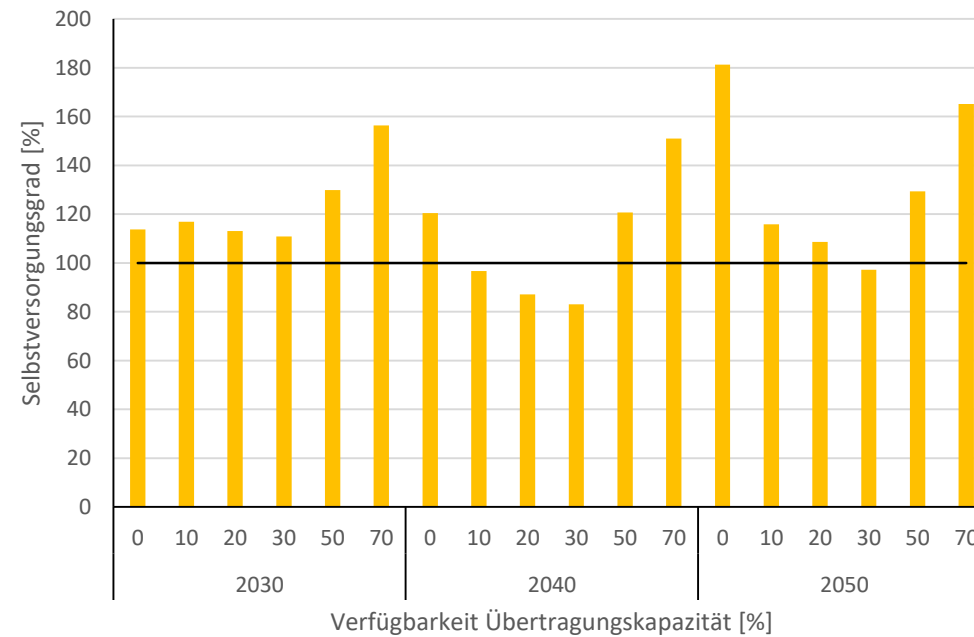
# REPM Ergebnisse

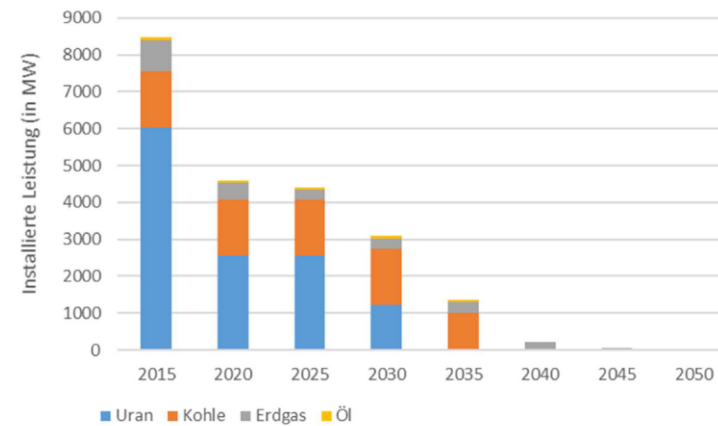
REPM

- REPM berechnet alle möglichen Szenarien, indem die Anteile der verschiedenen Komponenten des Energiesystems variiert werden: intermittierende Quellen (Wind und Sonne), kontrollierbaren Quellen und Speicher. Diese Komponenten werden als Koordinaten verwendet, um mithilfe einer Hauptkomponentenanalyse ein Diagramm zu erstellen.
- Die Szenarien werden dann in Clustern zusammengefasst. Die Kosten für jedes Szenario werden berechnet, um das kostengünstigste Szenario in jedem Cluster zu ermitteln. Das Diagramm zeigt alle möglichen Optionen, indem die Szenarien zueinander in Beziehung gesetzt werden.
- **Auf der linken Seite** der Grafik sind die Szenarien billiger, ihre Energie wird durch kontrollierbare Quellen erzeugt und sie benötigen wenig oder keine Speicherung. **Auf der rechten Seite** der Grafik sind die Szenarien dagegen teurer, sie verwenden weniger kontrollierbare Quellen, aber mehr Speicherung.
- **In Blau** nutzen die Szenarien einen höheren Anteil an Windenergie, **in Gelb** einen höheren Anteil an Solarenergie.



# Selbstversorgung





Ökonomische “Sterbelinie” der konventionellen Kapazitäten in der ORR (Eigene Darstellung)