



# Optimierte PPA Portfolios und Energiespeicher für die Produktion grünen Wasserstoffs

18. Symposium Energieinnovation

15.02.2024

Jonas Brucksch, Jonas van Ouwerkerk, Dirk Uwe Sauer

Lehrstuhl für Elektrochemische Energiewandlung  
und Speichersystemtechnik

**ISEA**  
Stromrichter-  
technik und  
Elektrische  
Antriebe

**RWTHAACHEN**  
UNIVERSITY

# Grüner Wasserstoff stellt Industrie vor Herausforderungen in der Strombeschaffung

 **Deutschlandfunk**

Energiewende: Die Bundesregierung setzt auf Wasserstoff

Deutschlandfunk, 28.07.2023

DERSTANDARD

Wie Wasserstoff die Industrie klimaneutral machen könnte - Forschung

derStandard, 28.05.2023

**Handelsblatt**

Grüner Wasserstoff ist doppelt so teuer wie gedacht

Handelsblatt, 13.10.2023

**ffe**

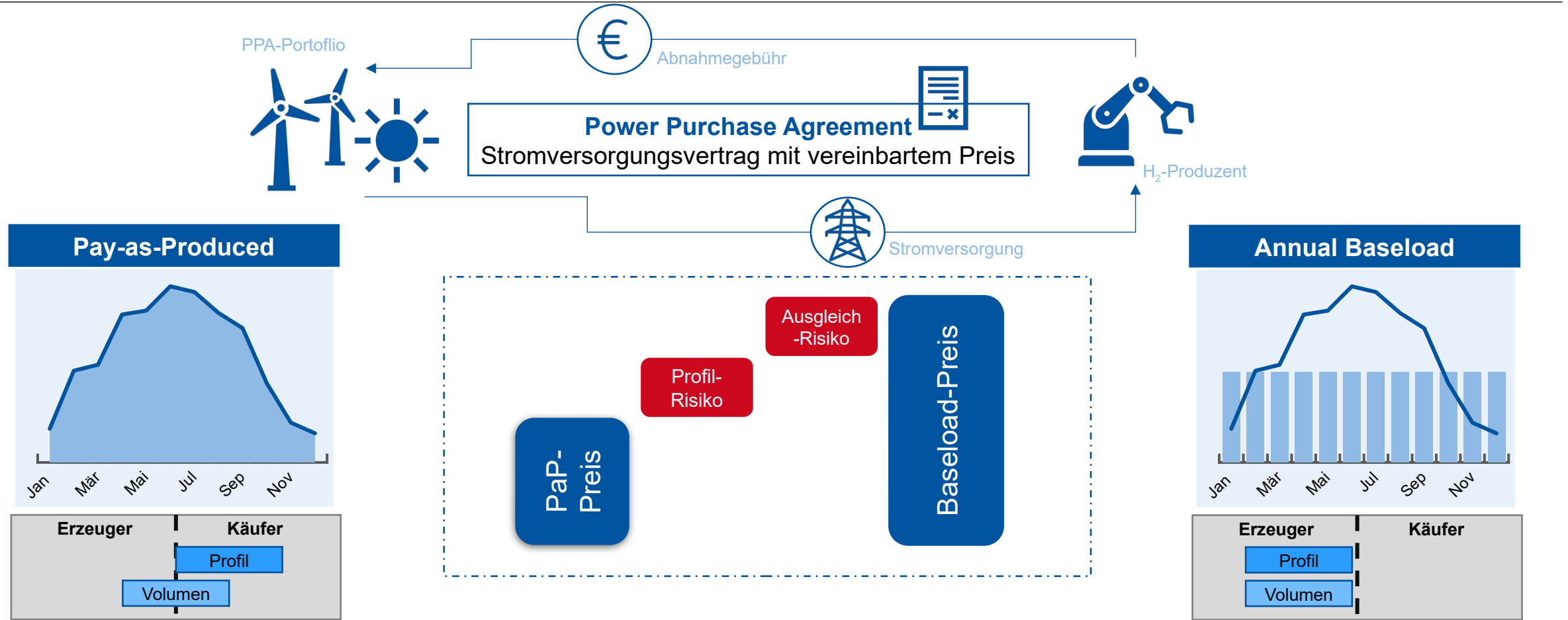
Lang erwartete Richtlinie zu grünem Wasserstoff

ffe, 20.02.2023

**RED2 2023:**

**Ab 2030 muss eine stündliche Übereinstimmung zwischen Einspeisung und H<sub>2</sub>-Produktion bestehen**

# Power Purchase Agreements als Möglichkeit zur Grünstrom-Beschaffung



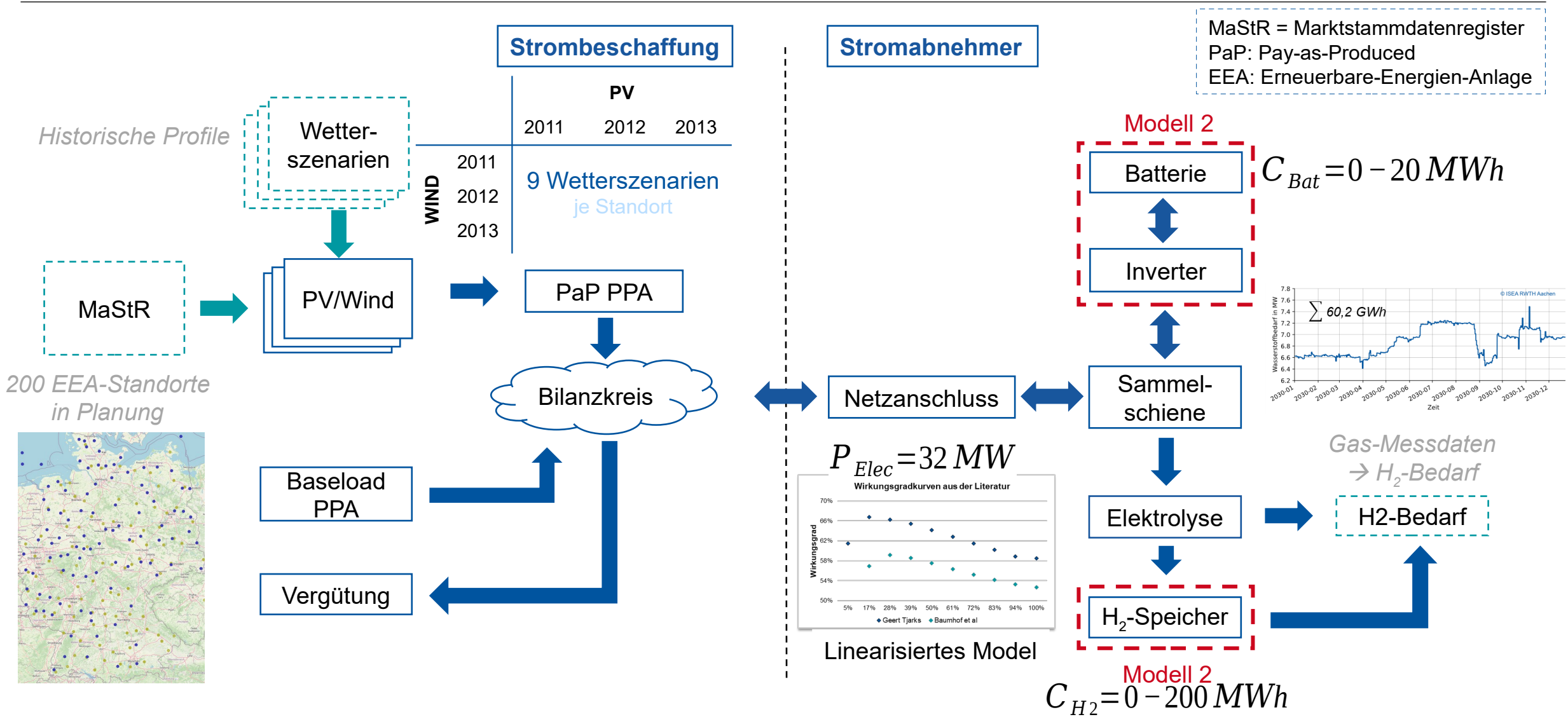
**Fragestellung**

Welchen Einfluss hat die Portfolio Zusammensetzung & Größe?

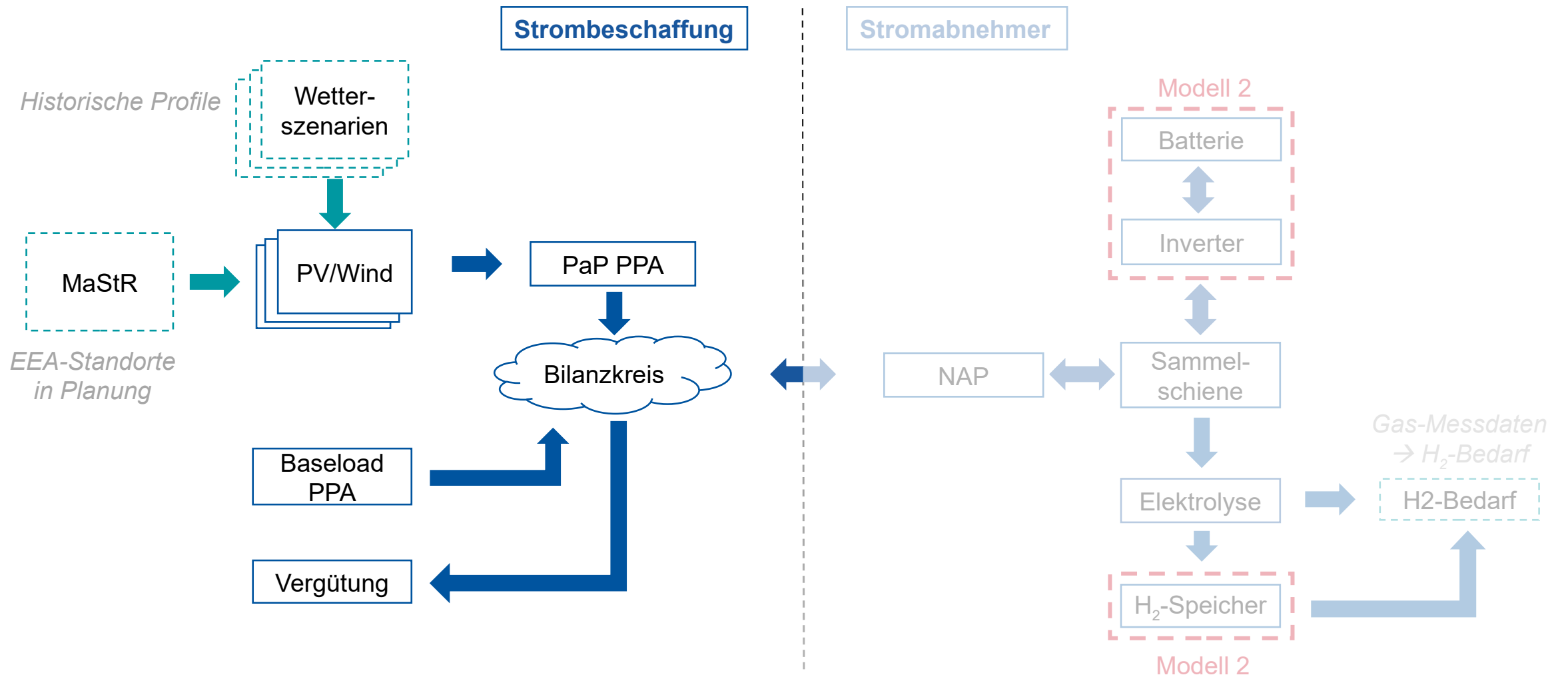
Können Energiespeicher zusätzlichen Nutzen bringen?

# Modellstruktur

## Mixed Integer Linear Program (MILP) zur Kostenminimierung



# Modellstruktur





# Strombeschaffung

## Standortvariation + Marktbedingung

MaStR 11.2023

- Nur in Planung stehende Anlagen > 1MW

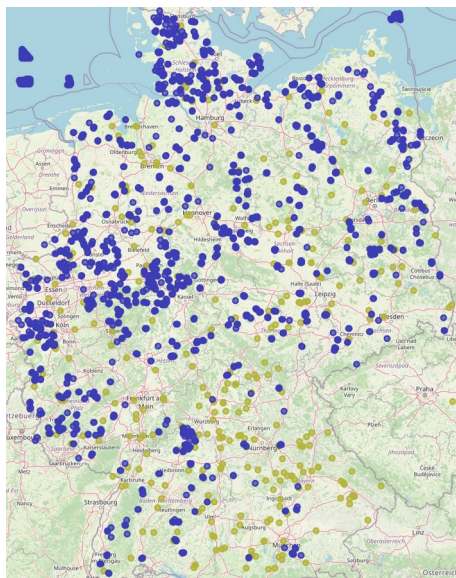
Anzahl geplanter Anlagen



2651



339



Filter



EEA-Clusters

- 100 Cluster pro Tech.
- Nominelle Leistungen für jedes Cluster aggregiert

Cluster Leistungen



$\sum$  15,3 GW  
Ø 154 MW



$\sum$  3 GWp  
Ø 30 MWp

Preise



98,6 €/MWh



59 €/MWh

Pay-as-Produced

\*Baseload-Faktor

| BLF | Baseload  |
|-----|-----------|
| 1,5 | 148 €/MWh |
| 2,0 | 197 €/MWh |
| 2,5 | 247 €/MWh |
| 3,0 | 296 €/MWh |
| 3,5 | 345 €/MWh |

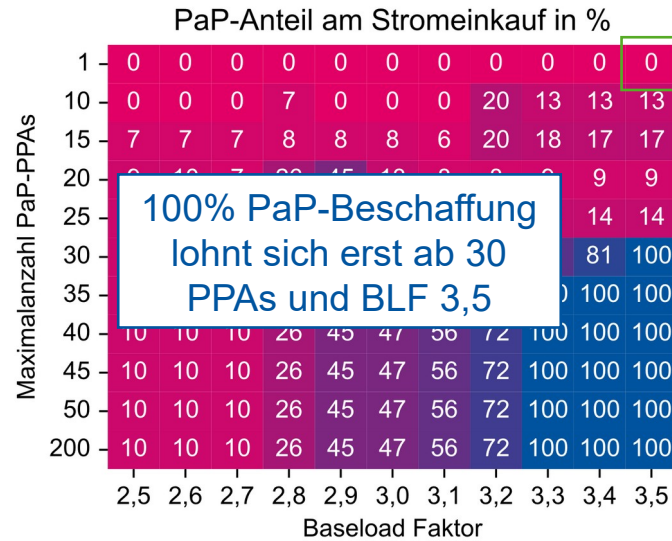
Baseload

\*Abgerufen: 19.01.2024

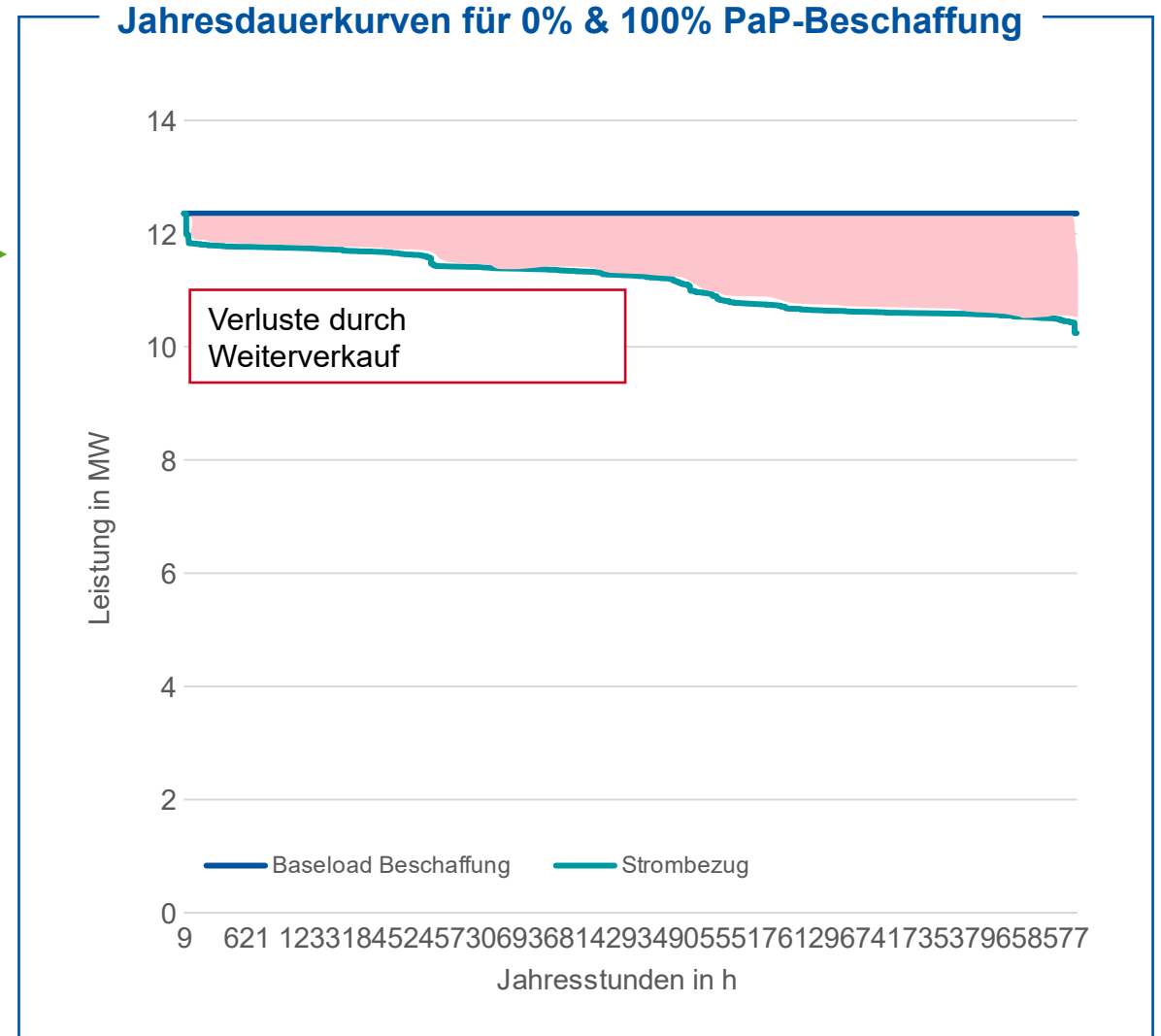
Vergütung

Quellen: <sup>1</sup>Fraunhofer ISE, <sup>2</sup>EEX Phelix Baseload

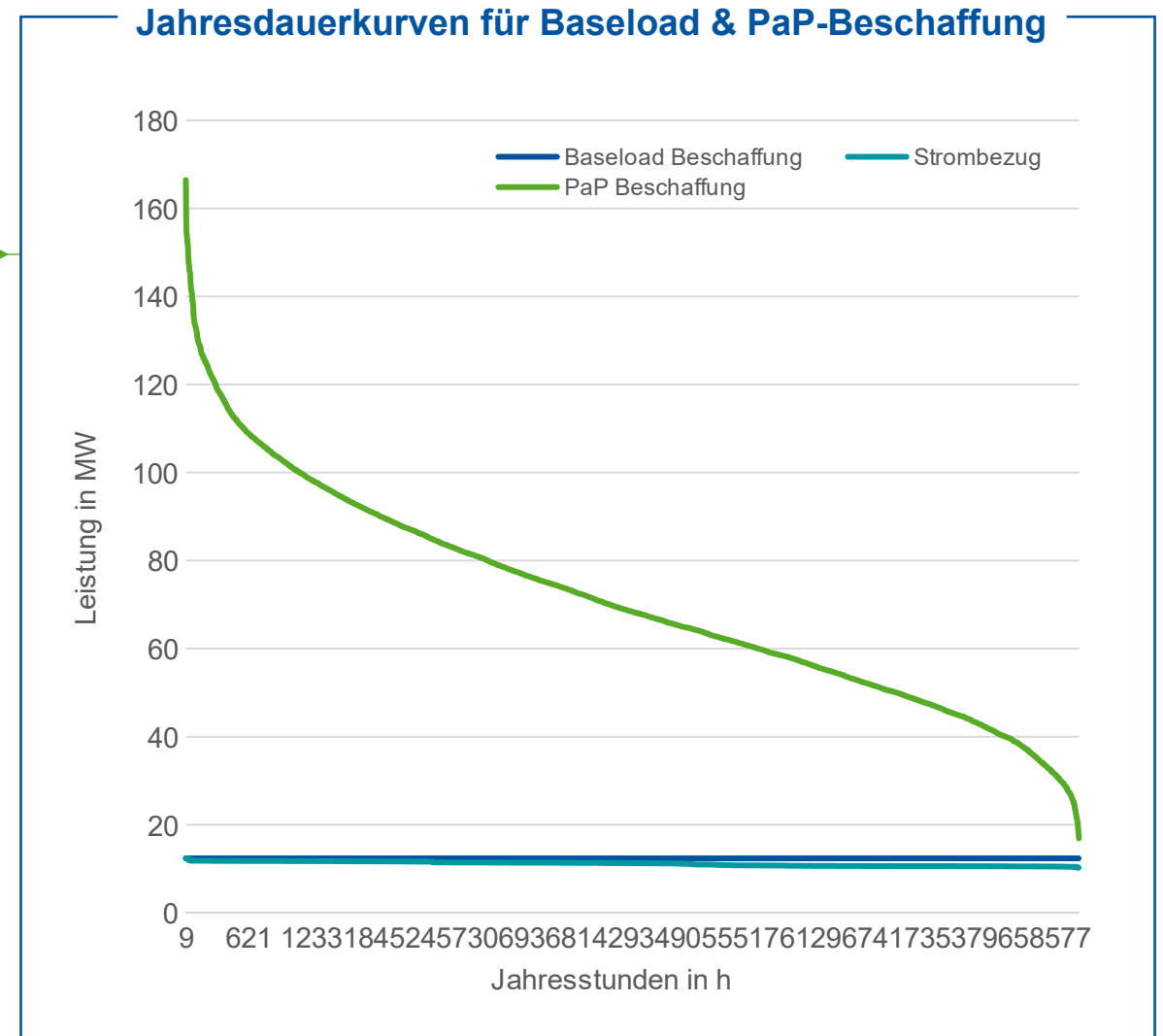
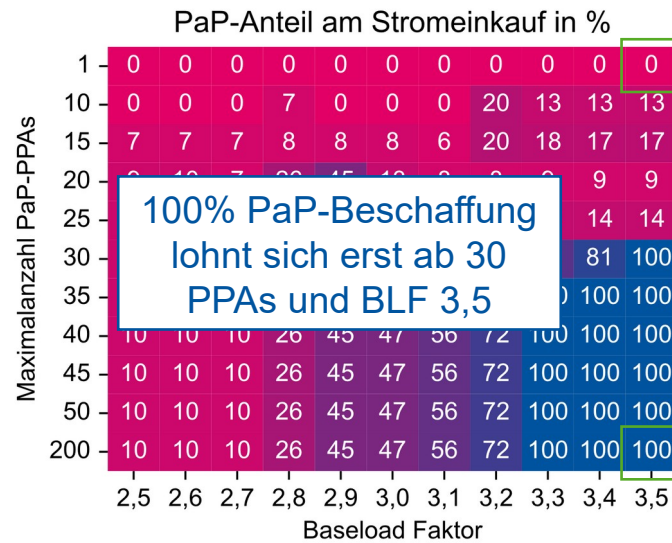
# Nutzen der Portfoliooptimierung



100% PaP-Beschaffung lohnt sich erst ab 30 PPAs und BLF 3,5

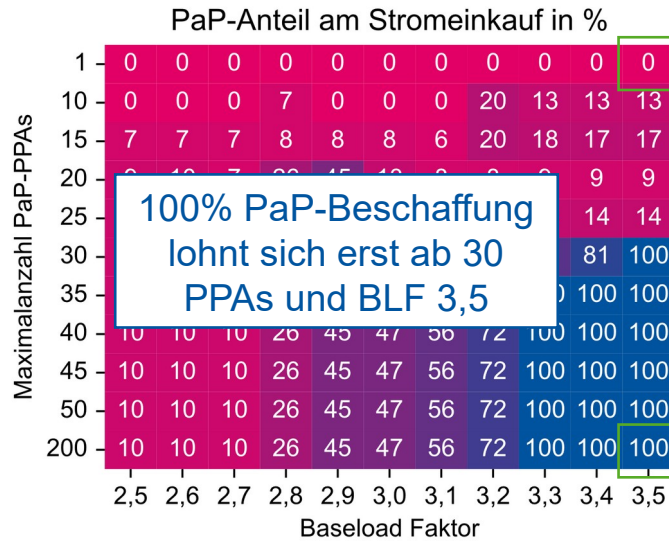


# Nutzen der Portfoliooptimierung

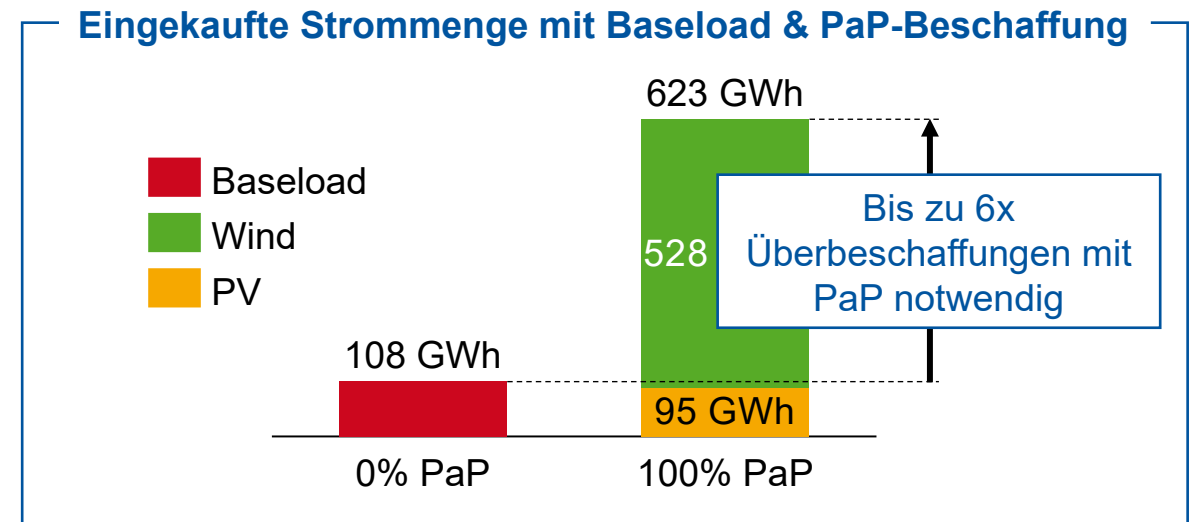
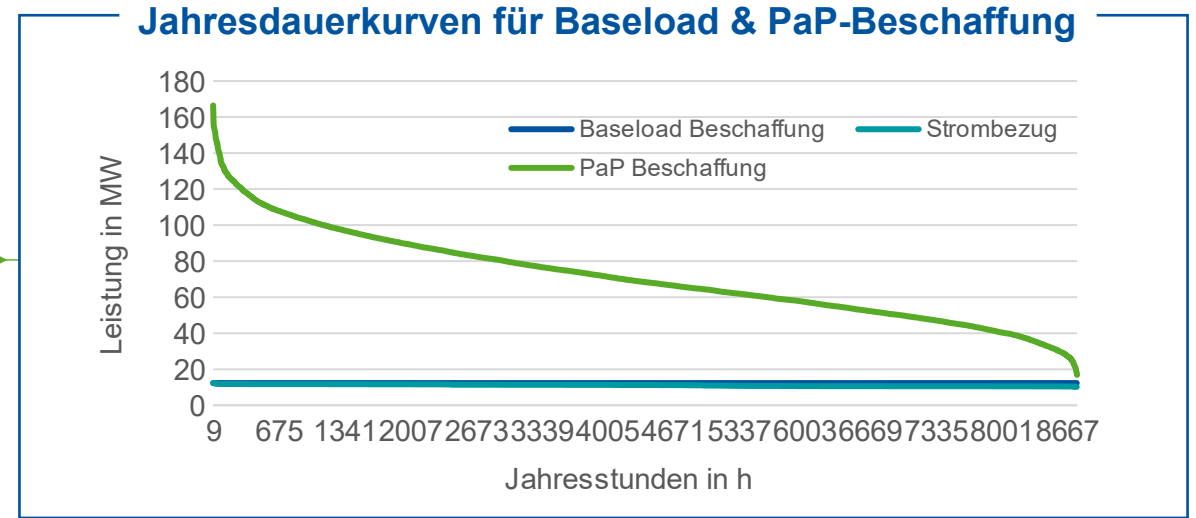




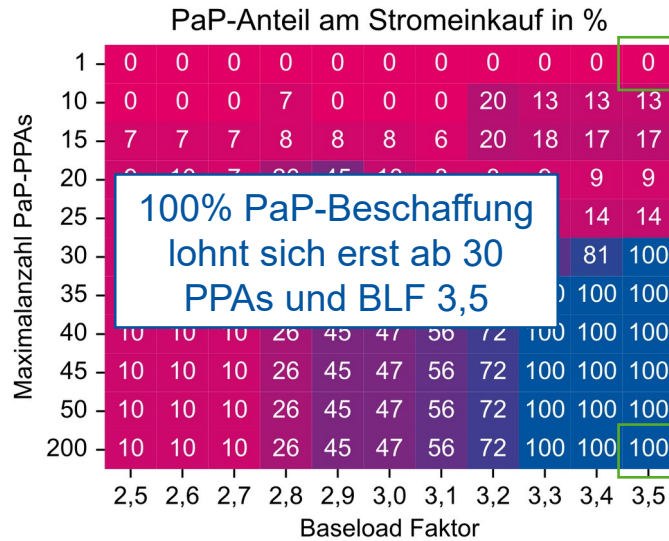
# Nutzen der Portfoliooptimierung



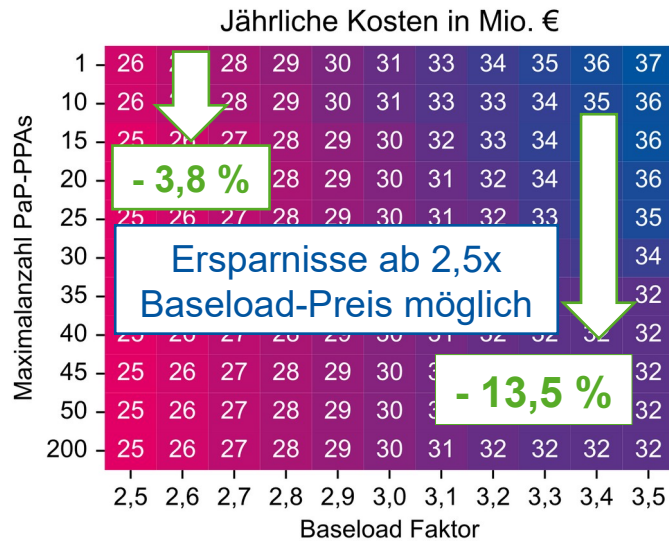
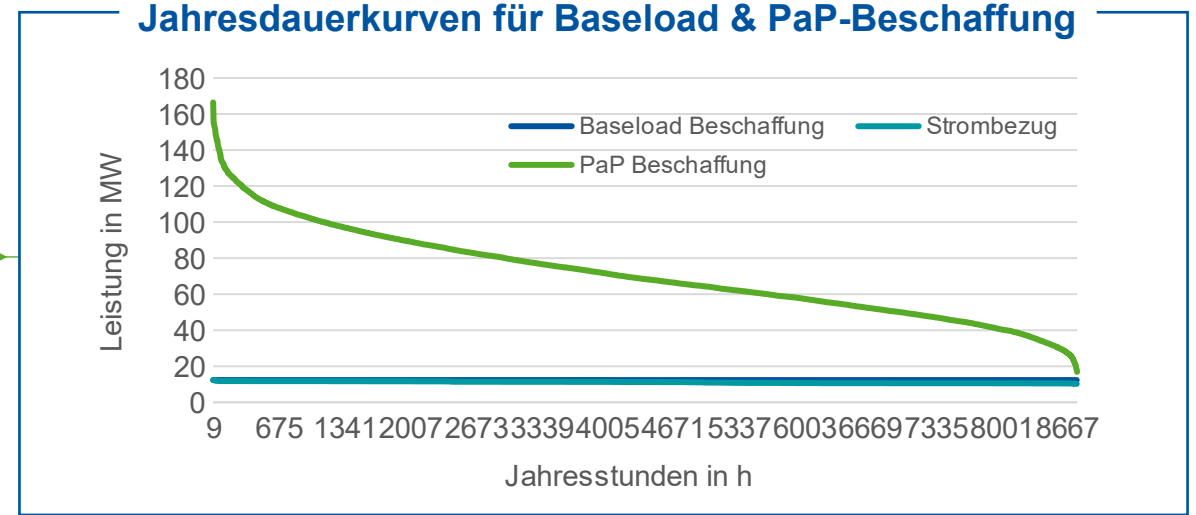
100% PaP-Beschaffung lohnt sich erst ab 30 PPAs und BLF 3,5



# Nutzen der Portfoliooptimierung



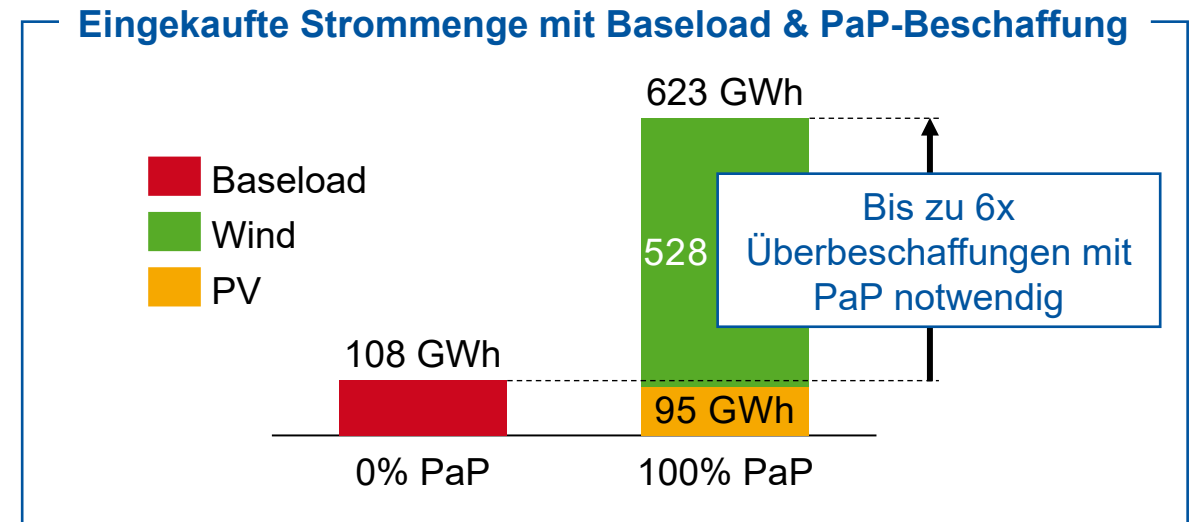
100% PaP-Beschaffung lohnt sich erst ab 30 PPAs und BLF 3,5



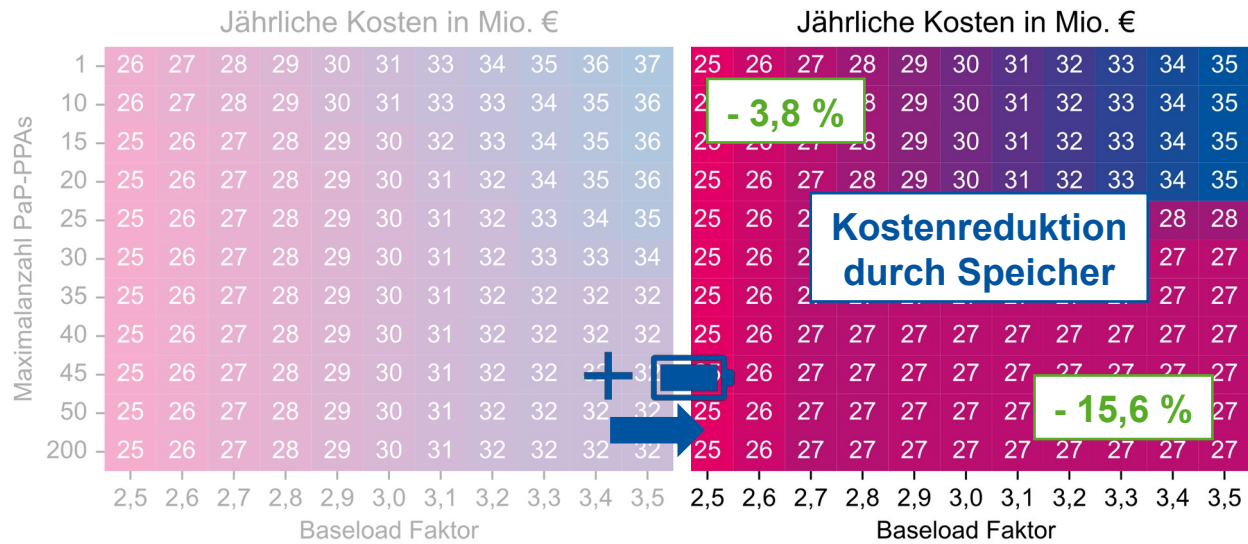
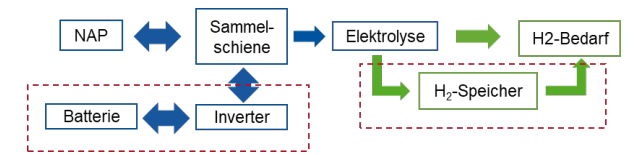
- 3,8 %

Ersparnisse ab 2,5x Baseload-Preis möglich

- 13,5 %



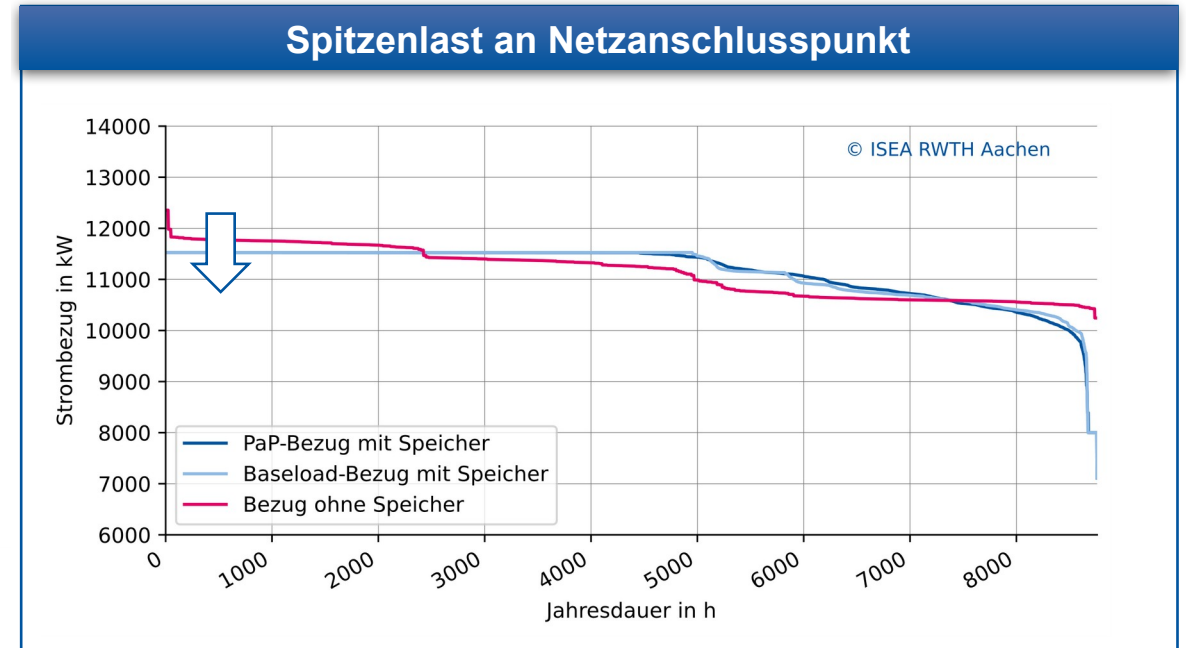
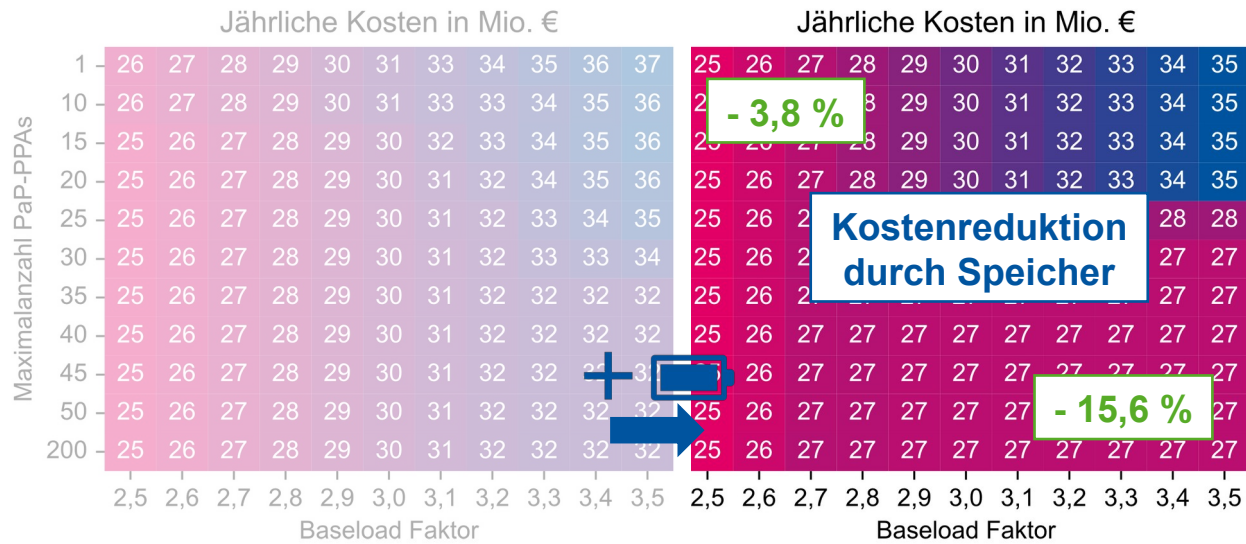
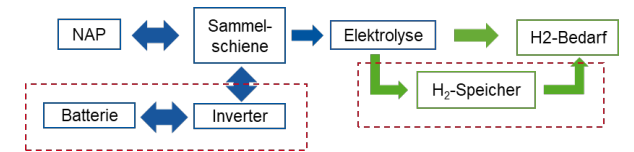
# Ökonomische Verbesserung durch Speicher



## Mögliche Gründe für Kostenreduktion

| Anwendung                | Auswirkung                |
|--------------------------|---------------------------|
| Spitzenlastkappung       | → Reduzierte Netzentgelte |
| Effizientere Elektrolyse | → Weniger Strombedarf     |
| Portfolio-Verbesserung   | → Weniger Stromeinkauf    |

# Ökonomische Verbesserung durch Speicher



| Mögliche Gründe für Kostenreduktion |                           |
|-------------------------------------|---------------------------|
| Anwendung                           | Auswirkung                |
| Spitzenlastkappung                  | → Reduzierte Netzentgelte |
| Effizientere Elektrolyse            | → Weniger Strombedarf     |
| Portfolio-Verbesserung              | → Weniger Stromeinkauf    |

**Spitzenlast**  
 - 1 MW

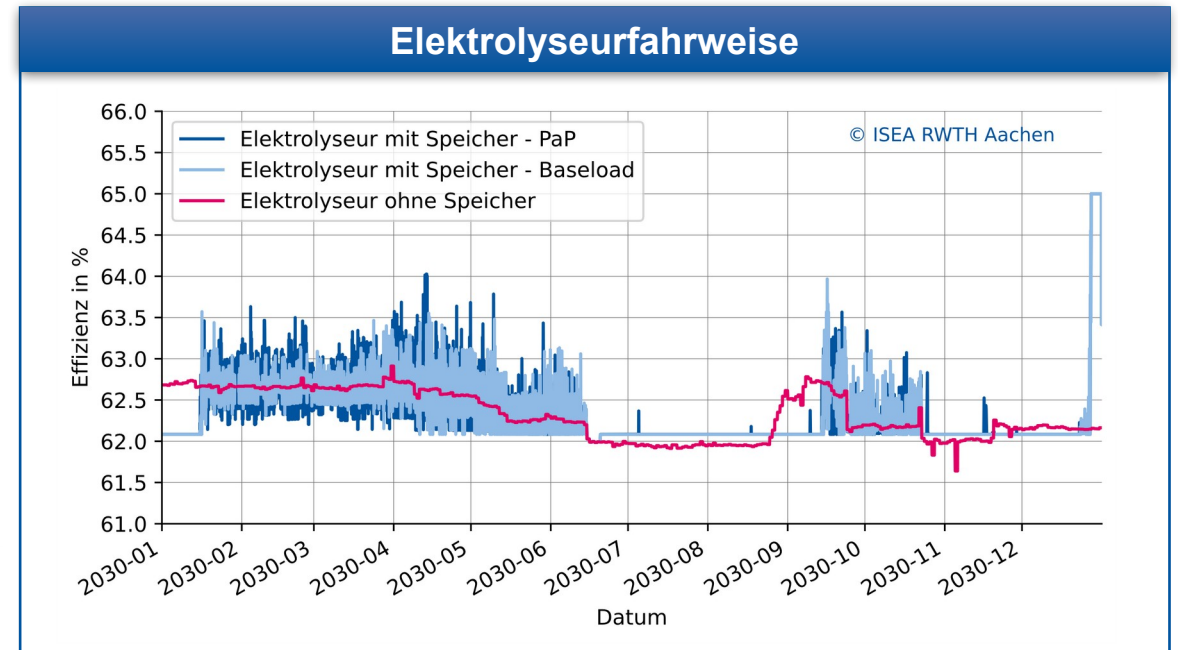
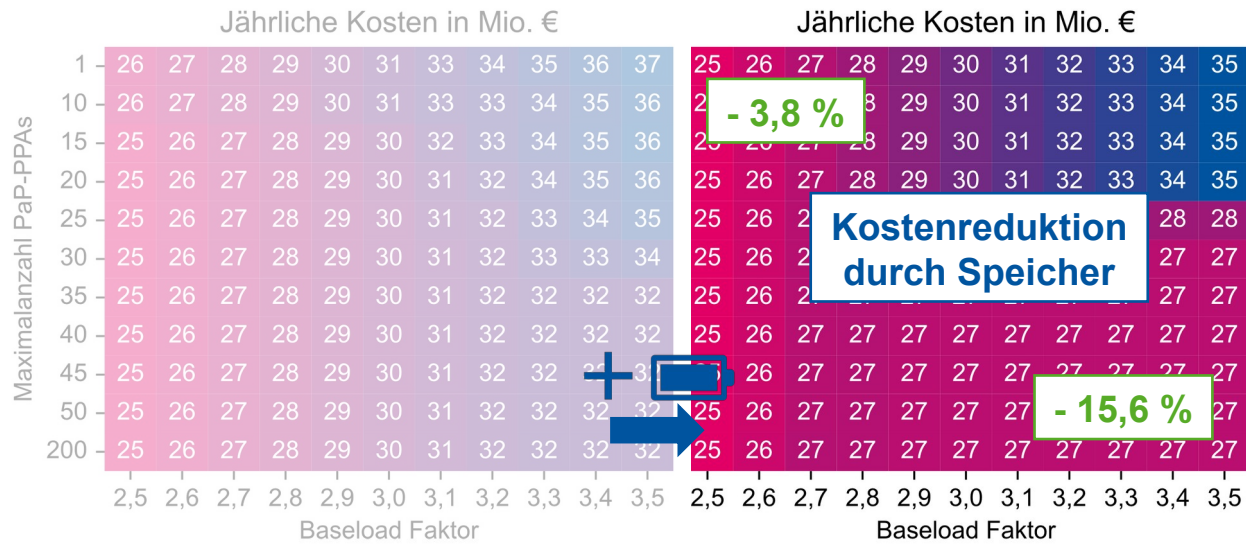
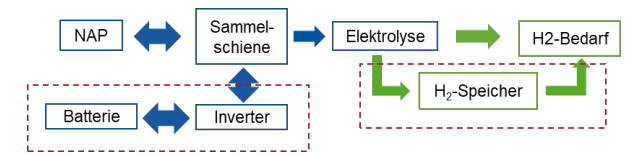
**Kostenreduktion**  
 - 145.000 €/a

Bei einem Spitzenleistungspreis von 175,53 €/kW

➤ erklärt nicht die vollständige Kosteneinsparung nach Speichernutzung



# Ökonomische Verbesserung durch Speicher



### Mögliche Gründe für Kostenreduktion

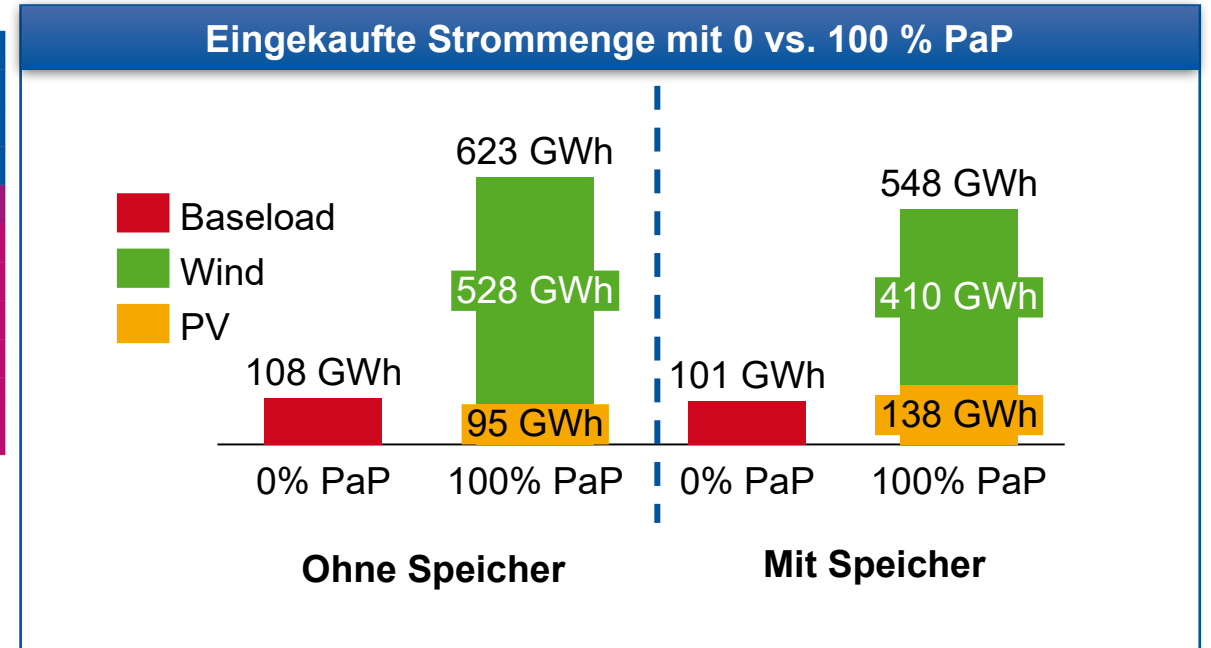
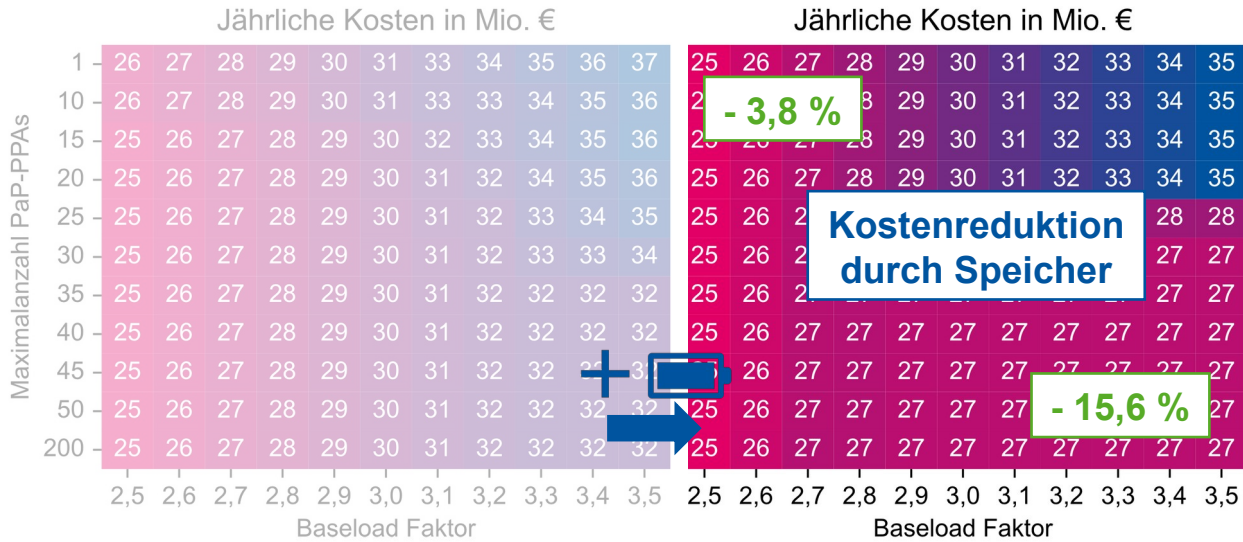
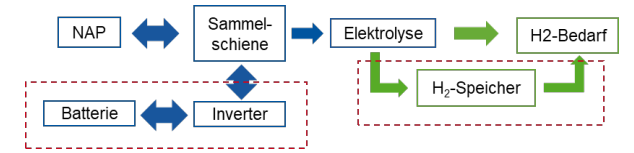
| Anwendung                | Auswirkung                |
|--------------------------|---------------------------|
| Spitzenlastkappung       | → Reduzierte Netzentgelte |
| Effizientere Elektrolyse | → Weniger Strombedarf     |
| Portfolio-Verbesserung   | → Weniger Stromeinkauf    |

|                                       |   |  |
|---------------------------------------|---|--|
| <b>Bedarfsreduktion</b><br>- 5,37 MWh | + | <b>Effizienzsteigerung</b><br>+ 0,01 pp. |
|---------------------------------------|---|--|

- Deutlich flexiblere Fahrweise erkennbar
- Einsparung jedoch marginal (97 GWh Gesamtbedarf)

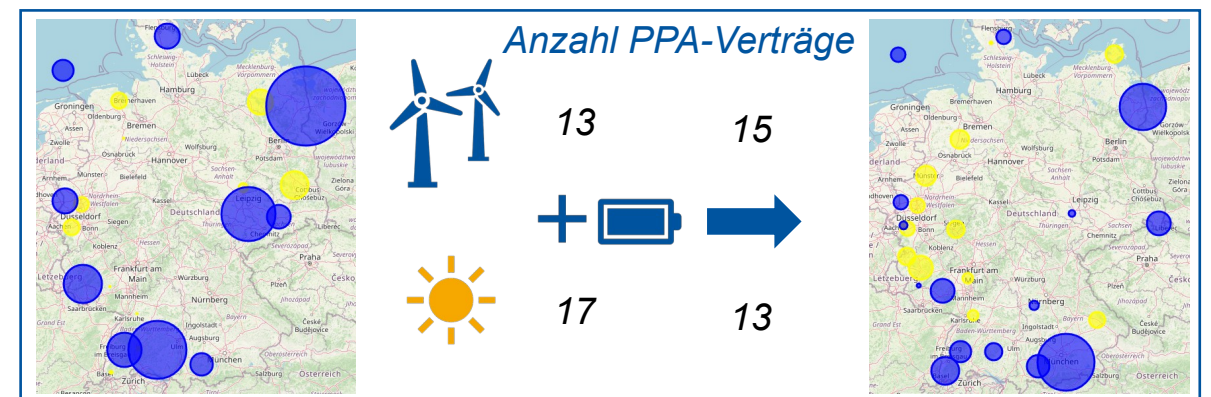


# Ökonomische Verbesserung durch Speicher

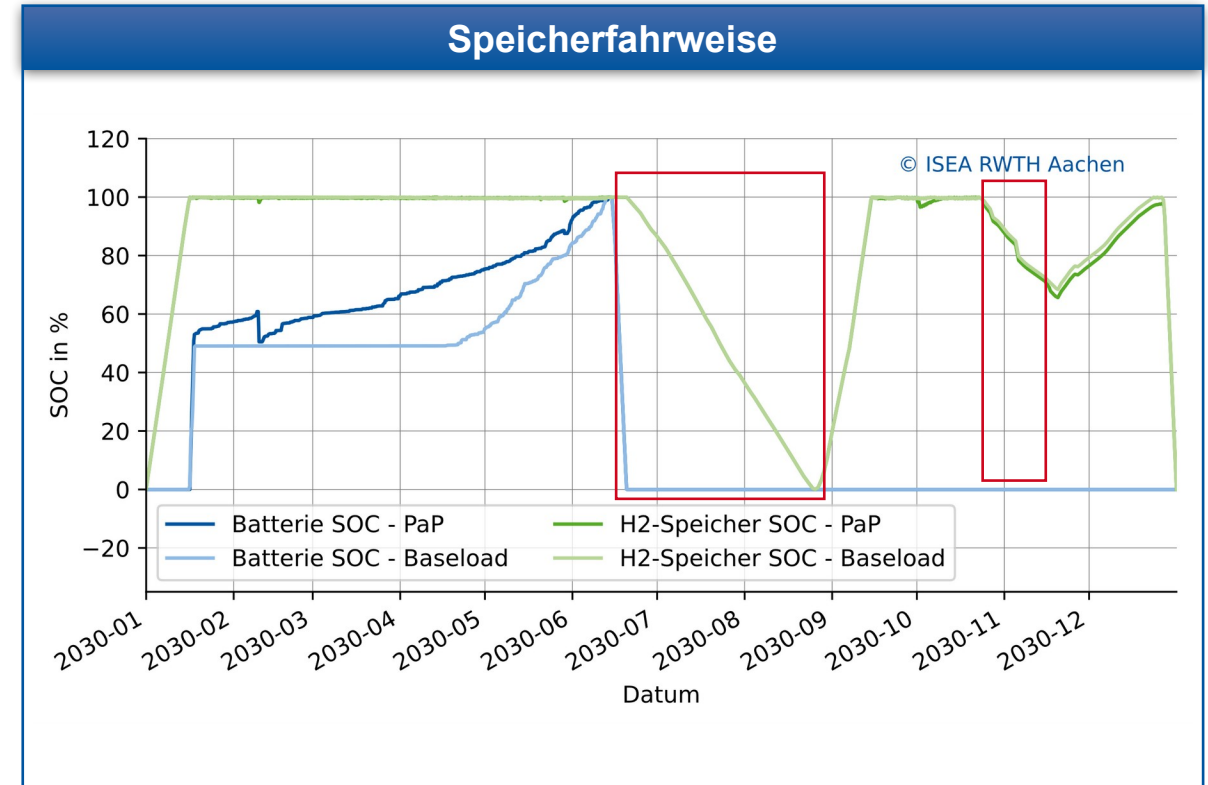
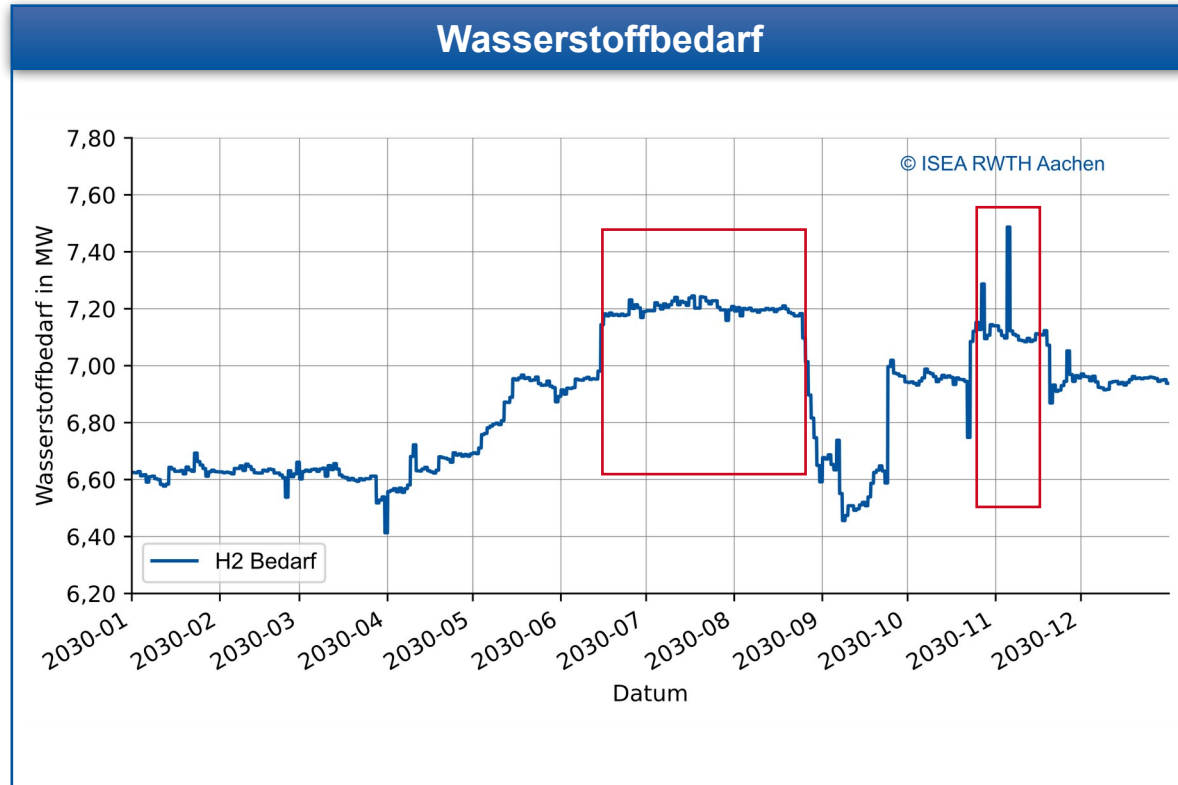
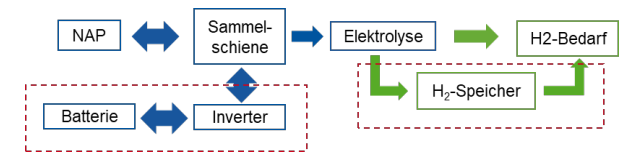


### Mögliche Gründe für Kostenreduktion

| Anwendung                | Auswirkung                |
|--------------------------|---------------------------|
| Spitzenlastkappung       | → Reduzierte Netzentgelte |
| Effizientere Elektrolyse | → Weniger Strombedarf     |
| Portfolio-Verbesserung   | → Weniger Stromeinkauf    |



# Portfolio-Optimierung durch Speichernutzung



## Wie hilft der Speicher, das effizientere Portfolio zu nutzen?

Es treten Hochlast-Zeitfenster auf



Genau an diesen Stellen werden Speicher entladen



Speicher-Nutzen vor allem durch Portfolio-Optimierung

# Zusammenfassung

## Portfolio-Optimierung

### Kostenreduktion

Mit BLF > 3 bis zu 13,5 %

### Preisabhängigkeit

Nutzen stark abhängig von PaP- & Baseload-Preis und Vergütung

### Preis-Intransparenz

PPA-Markt bietet wenig Transparenz

### Praktische Umsetzbarkeit

Fraglich, welche max. Vertragsanzahl realistisch ist

## Speicherzubau

### Zusätzliche Kostenreduktion

Bei betrachteten BLFs: ≤ 15,6 %

### Anwendungen

- Spitzenlastreduktion
  - Spitzenlastkosten ↓
  - Überbeschaffung (v.a. Baseload-Fall) ↓
- Effizienteres Portfolio
  - Geringere Überbeschaffung ↓
  - Größere PV-Anlagen, kleinere Wind-Anlagen

## Ausblick

Preisanalyse

Veränderter Bedarf

Ländervergleich

Detailliertere  
Modellierung





# Optimierte PPA Portfolios und Energiespeicher für die Produktion grünen Wasserstoffs

18. Symposium Energieinnovation

15.02.2024

Jonas Brucksch, Jonas van Ouwerkerk, Dirk Uwe Sauer

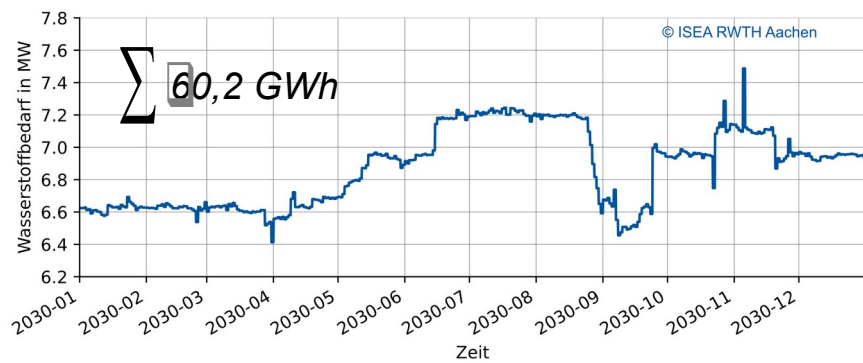
Lehrstuhl für Elektrochemische Energiewandlung  
und Speichersystemtechnik

**ISEA**  
Stromrichter-  
technik und  
Elektrische  
Antriebe

**RWTH**AACHEN  
UNIVERSITY

# Szenarienanalyse

## Wasserstoffbedarf



## Wetterszenarien (WS)



Für jedes Cluster

|      |      | PV                               |      |      |
|------|------|----------------------------------|------|------|
|      |      | 2011                             | 2012 | 2013 |
| WIND | 2011 | 9 Wetterszenarien<br>je Standort |      |      |
|      | 2012 |                                  |      |      |
|      | 2013 |                                  |      |      |

## Modellierung

$$\min I^c + \sum_j p_j * (O_j^{PPA} - E_j) i$$

Investitionskosten

Erwartungswert der WS mit Wahrsch.

Speicher

Strombeschaffungskosten

Vergütung

## Variationen



PPA-Limitierung  
1-200 PPA



Baseload-Faktor  
2,5-3,5



Model 1 vs. Model 2



Fragestellung

Model 1

Welchen Einfluss hat die Portfolio  
Zusammensetzung & Größe?



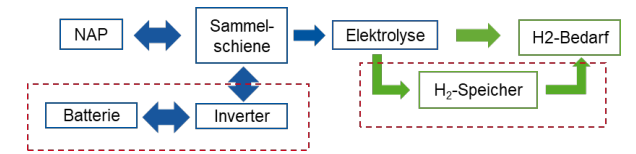
Model 2

Können Energiespeicher zusätzlichen  
Nutzen bringen?

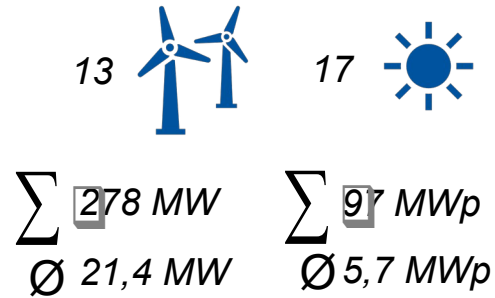
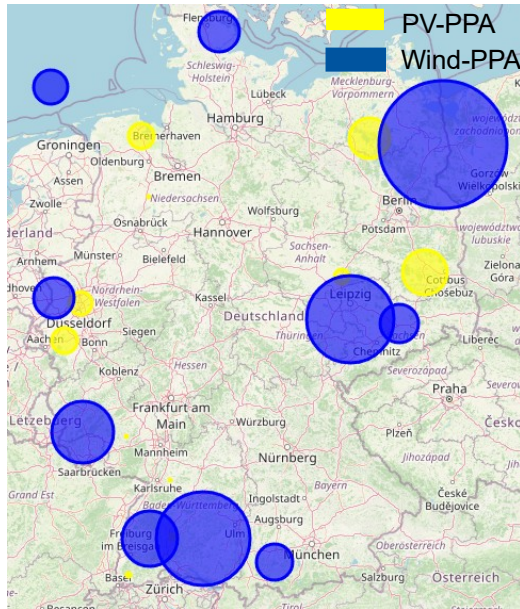




# Portfolio-Anpassung durch Speicher möglich

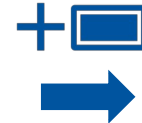


## Portfolio ohne Speicher

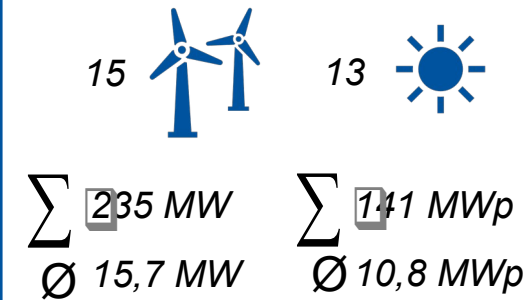
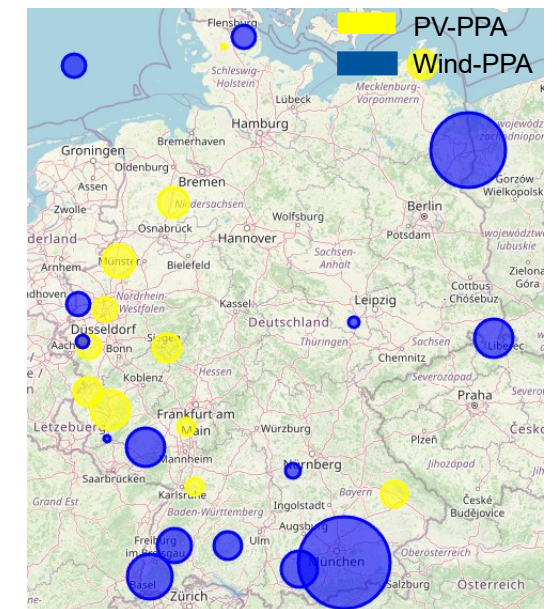


Ohne Speicher

$\sum$  375 MW



## Portfolio mit Speicher



Mit Speicher

$\sum$  376 MW

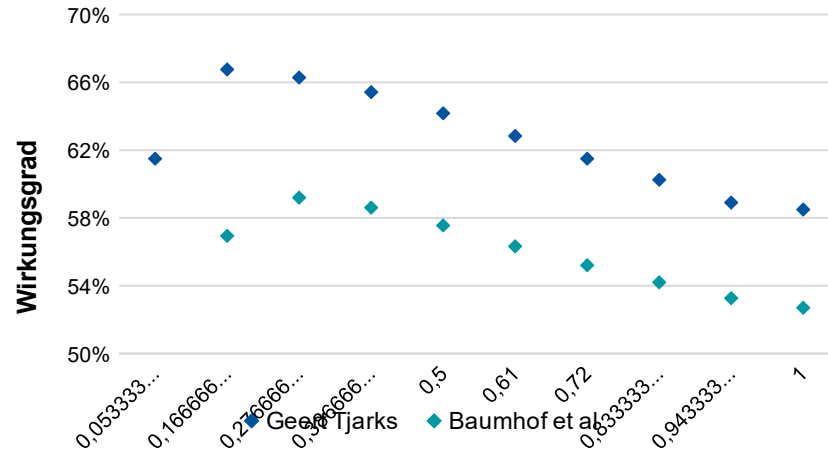
Wie können Energiespeicher helfen, bei gleicher kontraktierter Leistung die **besseren Verträge** zu schließen?

### Model 1 - Elektrolyseur

■ Strom ■ H<sub>2</sub>

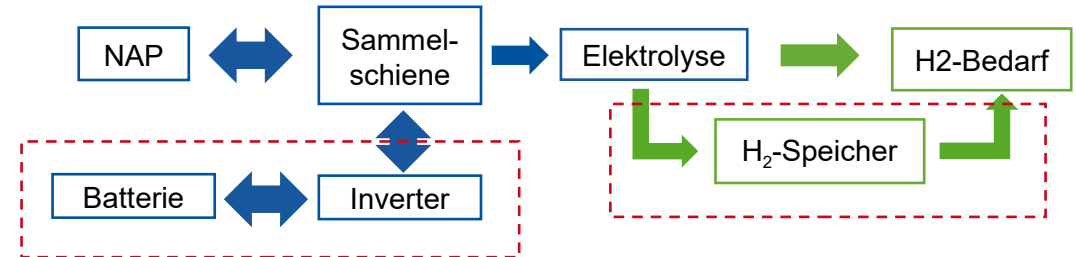


Wirkungsgradkurven aus der Literatur



- Arbeitspunktabhängige Effizienz
- Wirkungsgrad: 58-65 %
- Ohne Speicher → keine Flexibilitätspotenziale

### Model 2 - Energiespeicher



#### Modellierung

- Topfmodelle
- Statische Effizienzen
- E2P-Ratio = 1
- Inkl. Inverter / Kompressor

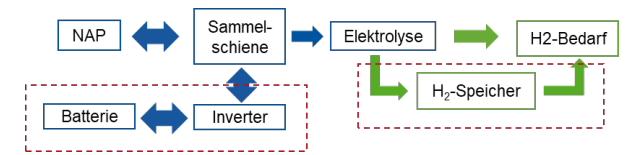
#### Batterie

- 630 €/kWh
- RT-η: 88,4 %
- Max. 20 MWh

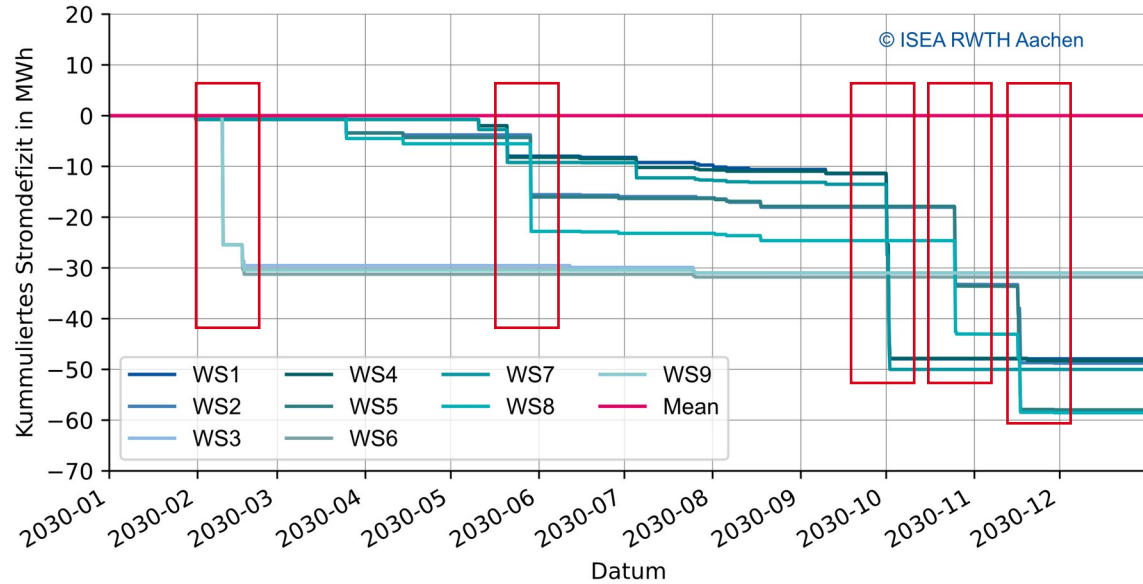
#### H<sub>2</sub>-Speicher

- 20 €/kWh
- RT-η: 100 %
- Max. 200 MWh

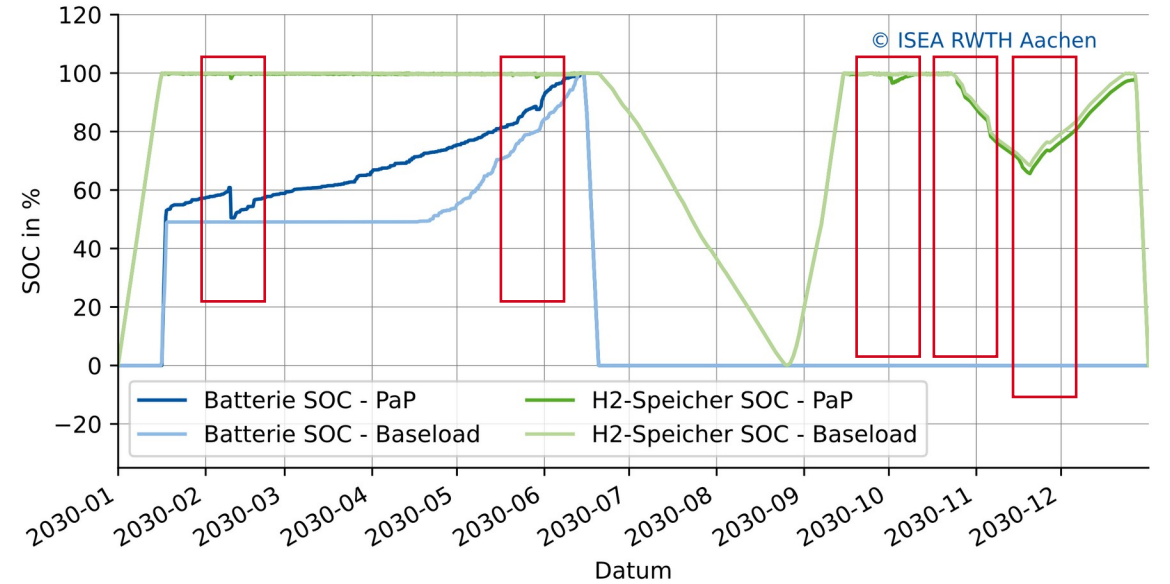
# Portfolio-Optimierung durch Speichernutzung



## Beschaffungsdefizite in den WS1-9 und Mittelwert



## Speicherfahrweise



## Wie hilft der Speicher, das effizientere Portfolio zu nutzen?

Es stechen Stellen hervor, an denen besonders hohe Defizite auftreten



Genau an diesen Stellen werden Speicher entladen



Speicher-Nutzen vor allem durch Portfolio-Optimierung