

Wärmespeicherkraftwerke

Franz Trieb

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart

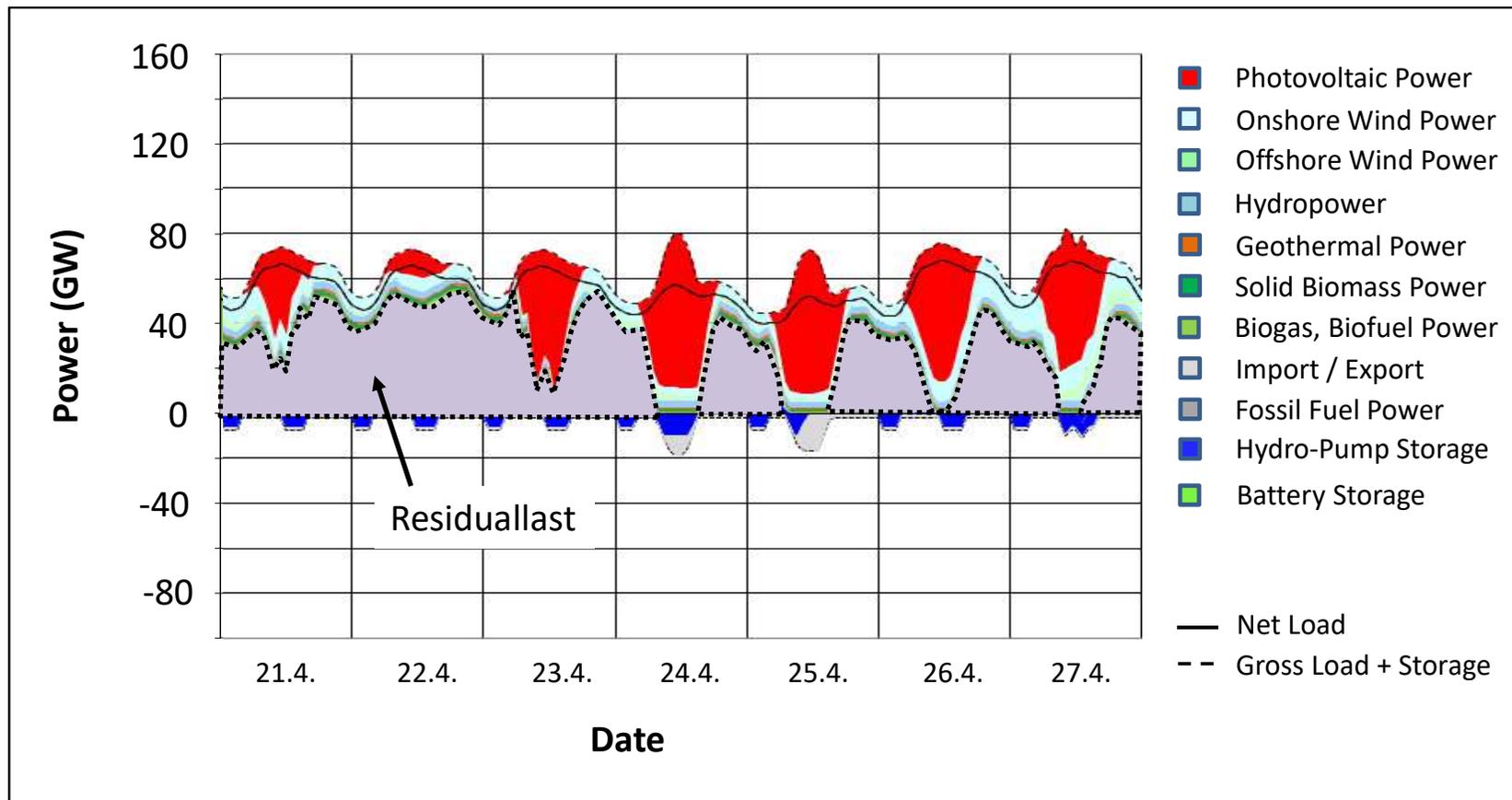
VBEW Webinar Energiespeicher
24.04.2024



Knowledge for Tomorrow



Das Residuallastproblem ab ca. 67% REN – Dunkelflauten und Abregelung

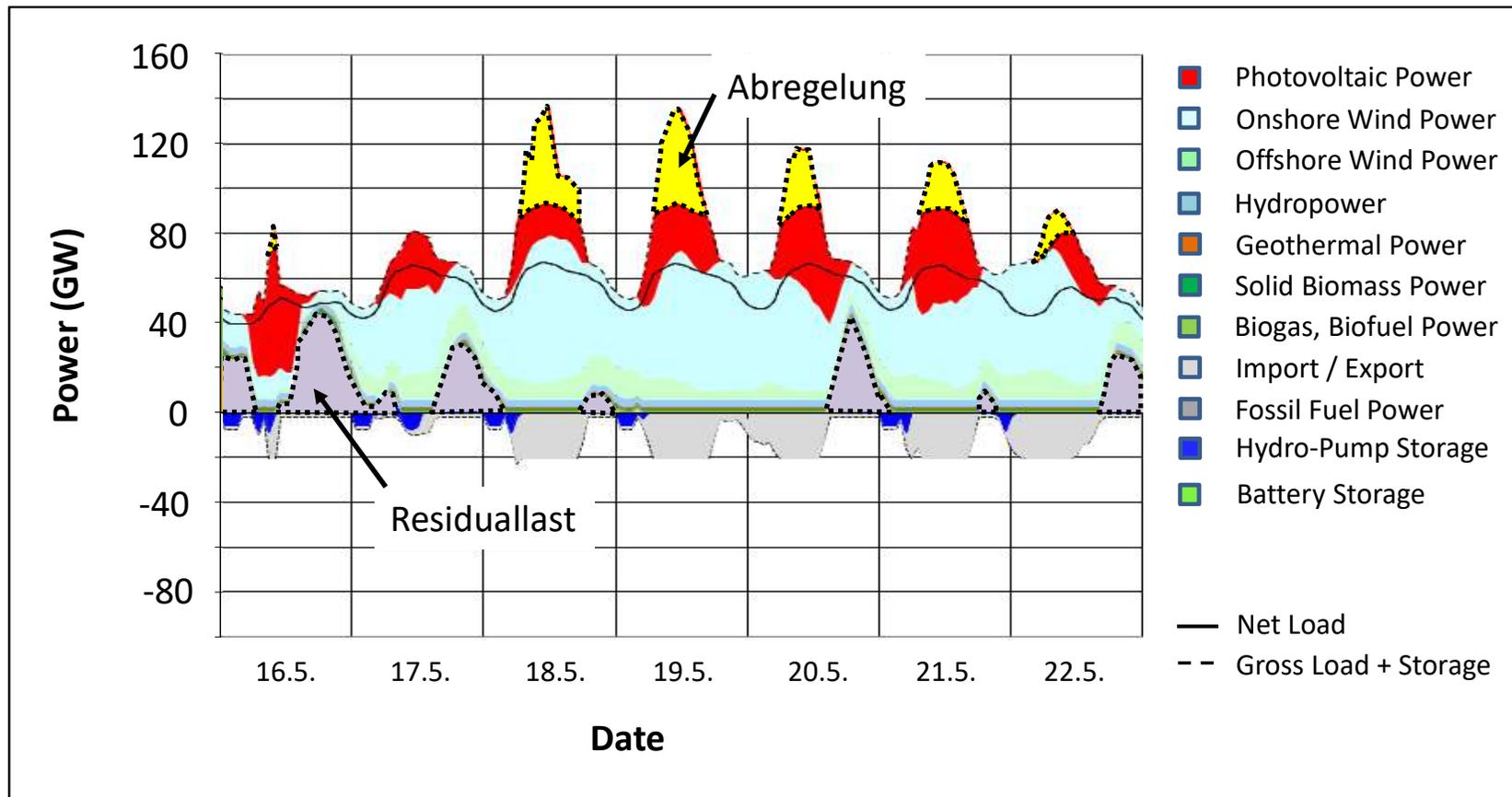


Deckung der Residuallast durch:

- Sichere Importe?
- Effiziente + flexible Kraftwerke mit Erdgas + grünem Wasserstoff?
- Effiziente Speicher und Überschüsse?



Das Residuallastproblem ab ca. 67% REN – Dunkelflauten und Abregelung



Deckung der Residuallast durch:

- Sichere Importe?
- Effiziente + flexible Kraftwerke mit Erdgas + grünem Wasserstoff?
- Effiziente Speicher und Überschüsse?

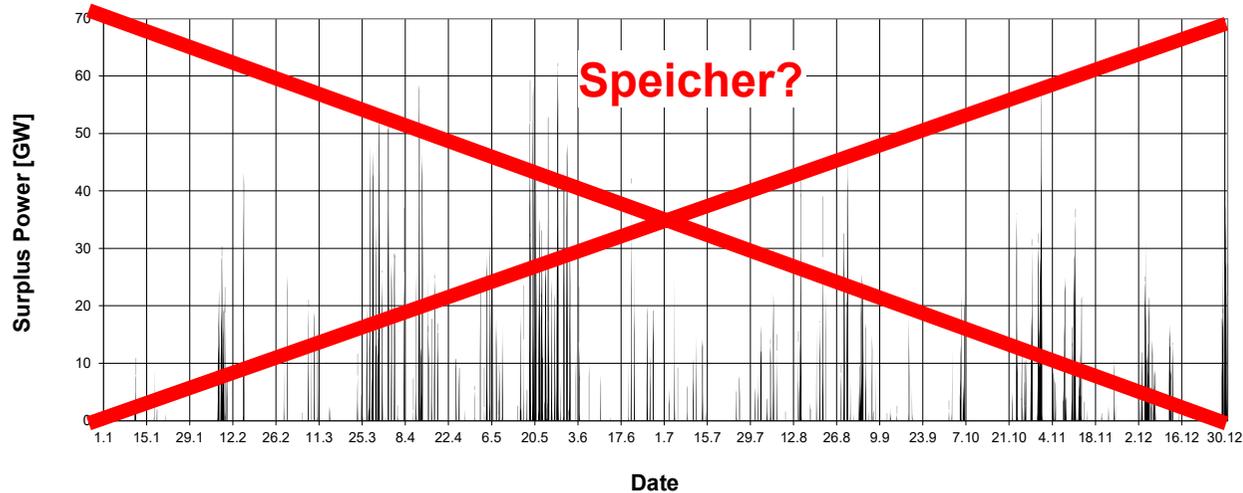
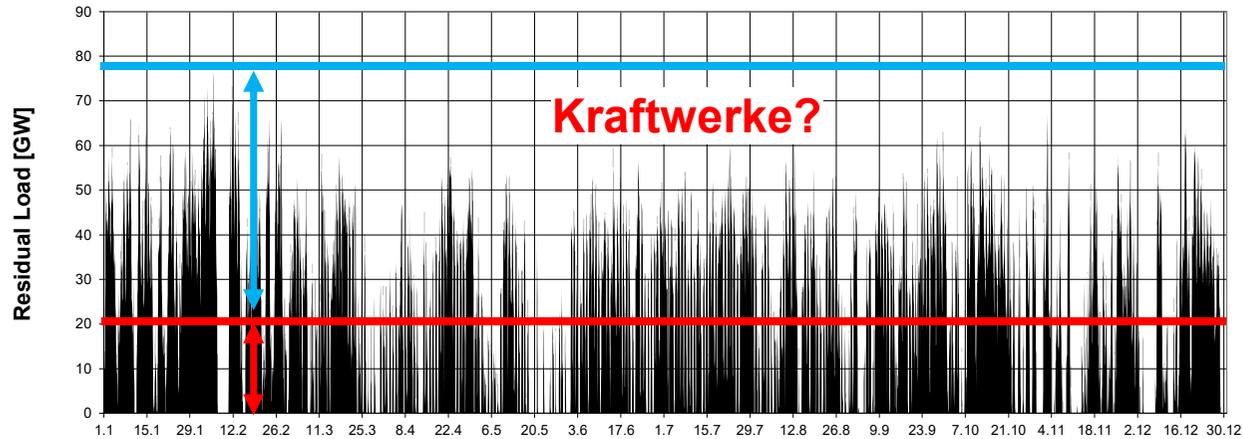


Die Aufgabe: Finde eine Lösung für das Residuallastproblem!

- Intermittierend
- Unregelmäßig
- Hohe Leistung
- Geringe Auslastung
- Hohe Gradienten

➔ BMWK 2024:

- Kohlekraftwerke
- Gaskraftwerke
- Wasserstoff
- Netzverbund
- Abregelung



Residuallast:
200 TWh/a

Auslastung:
2700 Vbh/a (GuD)

1500 Vbh/a (GT)

5000 Vbh/a (DT)

Überschuss:
20 TWh/a

Auslastung:
300 Vbh/a

Lade- Entlade-
Zyklus ?????

Vbh = Volllastbetriebsstunden



Trieb & Jäger 2022
Trieb et al. 2023



BMWK Langfristszenarien und Kraftwerksstrategie 2024

Szenarien T45-Strom (2022) / T-45-PV+ (2024), Zieljahr 2045

- Gaskraftwerke mit Erdgas und zukünftig H₂.
- Extremer Ausbau der Netzverbundkapazitäten bis ca. **67/90 GW** für „sichere“ Leistung aus dem Ausland.
- Bis zu **200/34 TWh/a** Abregelung, vor allem verursacht durch Windenergie.
- Über **900 TWh/a** Stromäquivalente aus Importen (H₂-Import, Netzimport).
- Unsichere, ggf. ausufernde Kostenentwicklung.
- Starke Paradigmenwechsel bzgl. Versorgungsinfrastruktur in Richtung H₂ und „Flexibilitäten“.
- Stark reduzierte Nettoengpassleistung auf unter **70 GW** (Last **400/350 GW**, Residuallast **100/120 GW**) .
- Zunehmendes Blackout-Risiko laut entso-e.

BMWK. (2022). BMWK, Fraunhofer ISI, consentec, ifeu, TU Berlin. Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3_T45_Szenarien_15_11_2022_final.pdf

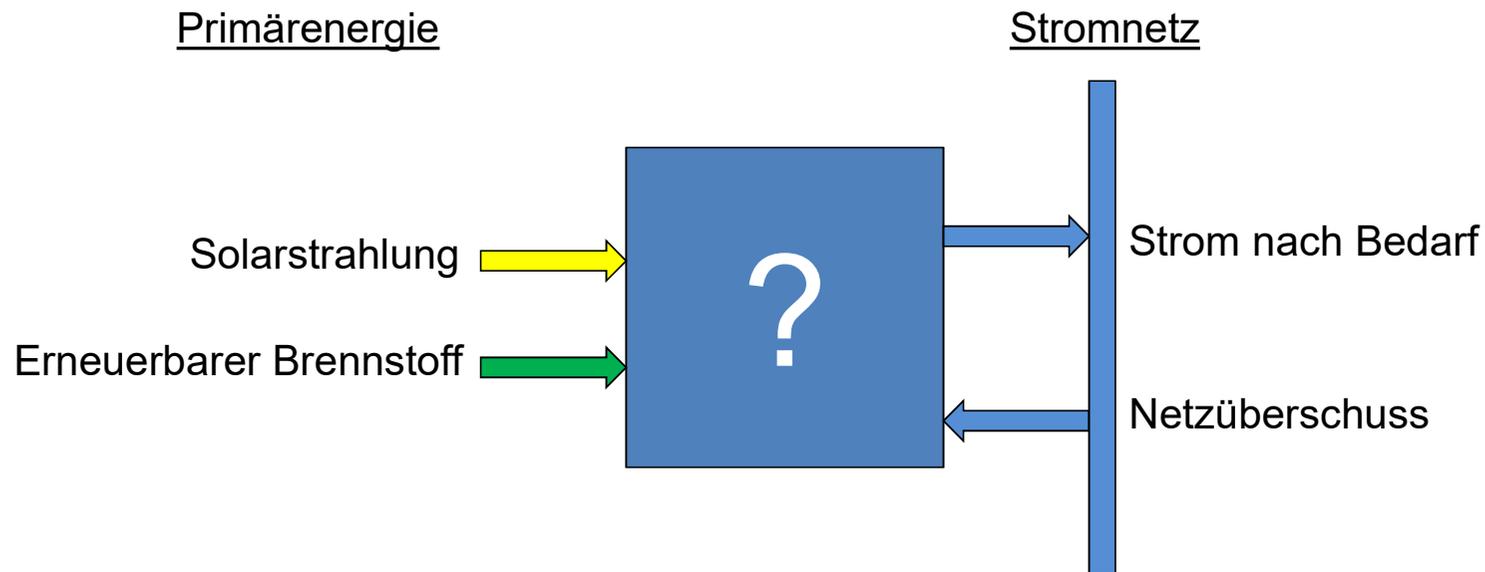
BMWK. (2024). BMWK, Fraunhofer ISI, consentec, ifeu, TU Berlin. Langfristszenarien. <https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/>

Entso-e. (2023). PROJECT INERTIA – PHASE II: Update frequency stability analysis in long term scenarios, relevant solutions and mitigation measures. https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/clean-documents/sdc-documents/231108_Project_Inertia_Phase_II_First_Report_FOR_PUBLICATION_clean.pdf



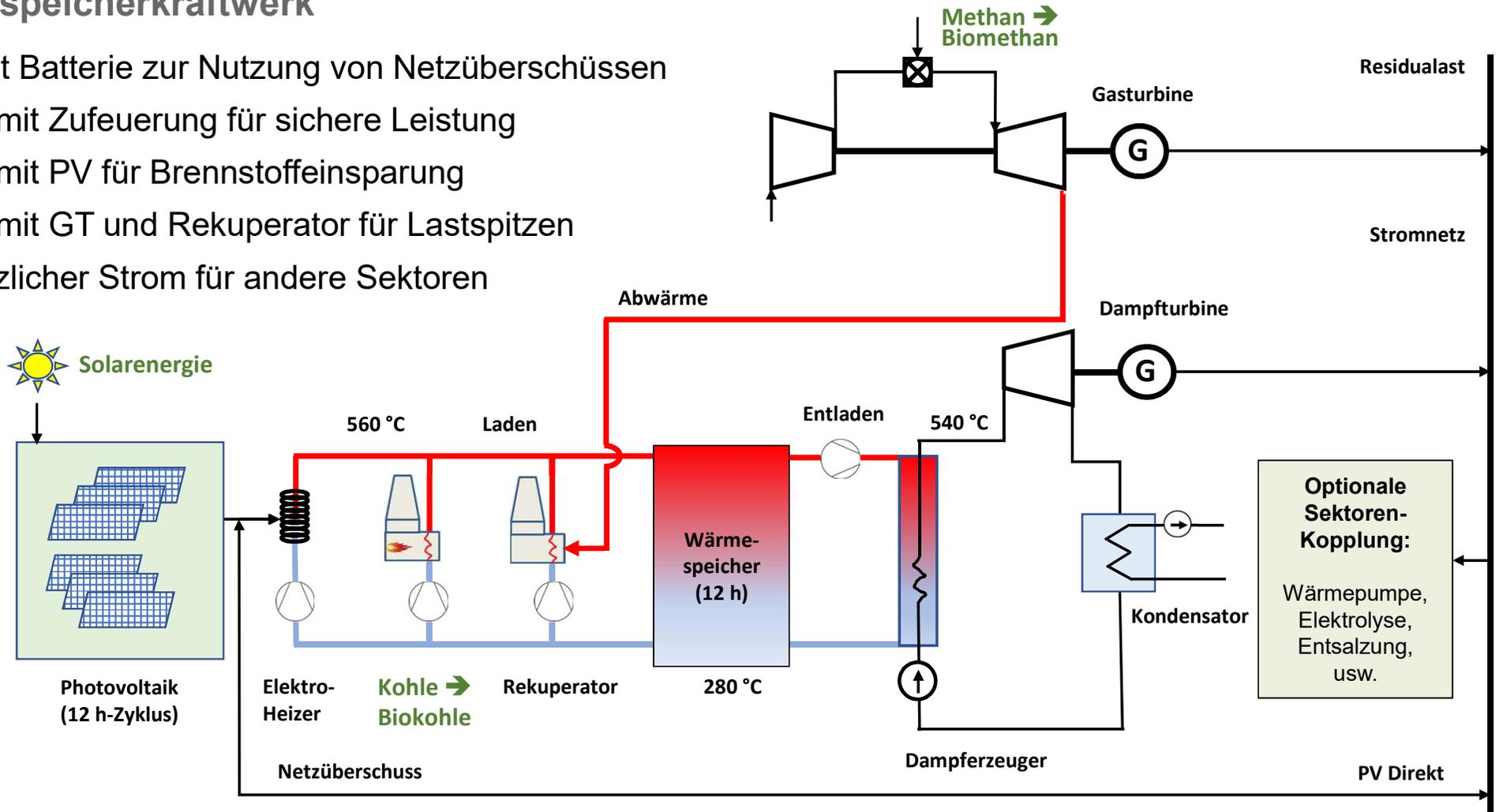
Gibt es eine befriedigendere Lösung für Dunkelflauten und Abregelung?

- Sichere, flexible und erneuerbare elektrische Leistung für die Dunkelflauten
- Nutzung von Stromüberschuss statt Abregelung



Wärmespeicherkraftwerk

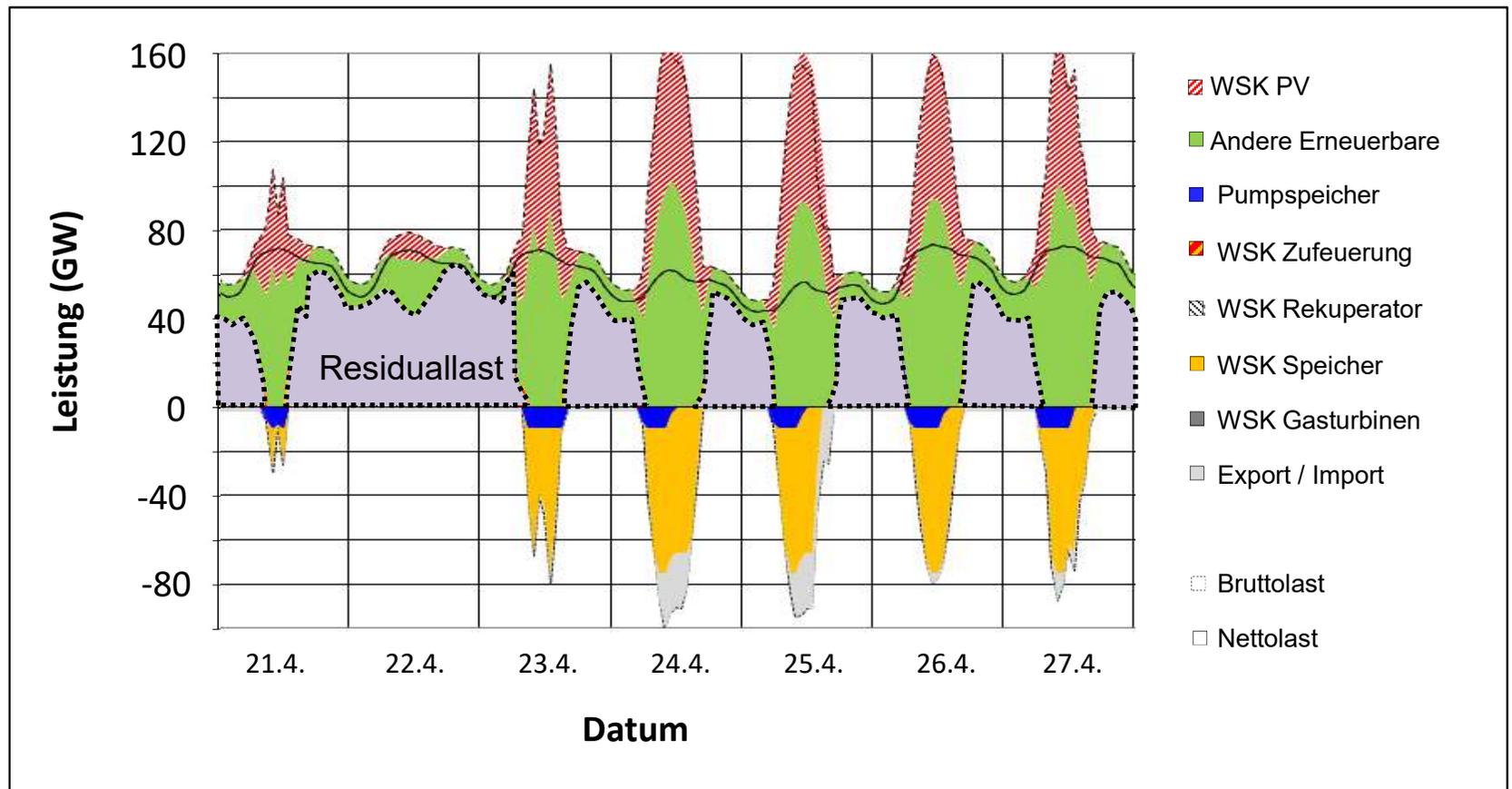
1. Carnot Batterie zur Nutzung von Netzüberschüssen
2. WSK mit Zufeuerung für sichere Leistung
3. WSK mit PV für Brennstoffeinsparung
4. WSK mit GT und Rekuperator für Lastspitzen
5. Zusätzlicher Strom für andere Sektoren



Wärmespeicherkraftwerke als Residuallastkraftwerke (Szenario Deutschland 2040)

WSK Konfiguration

DT	21 GW
GT	49 GW
PV	105 GW
TES	600 GWh _{th}
EH	69 GW



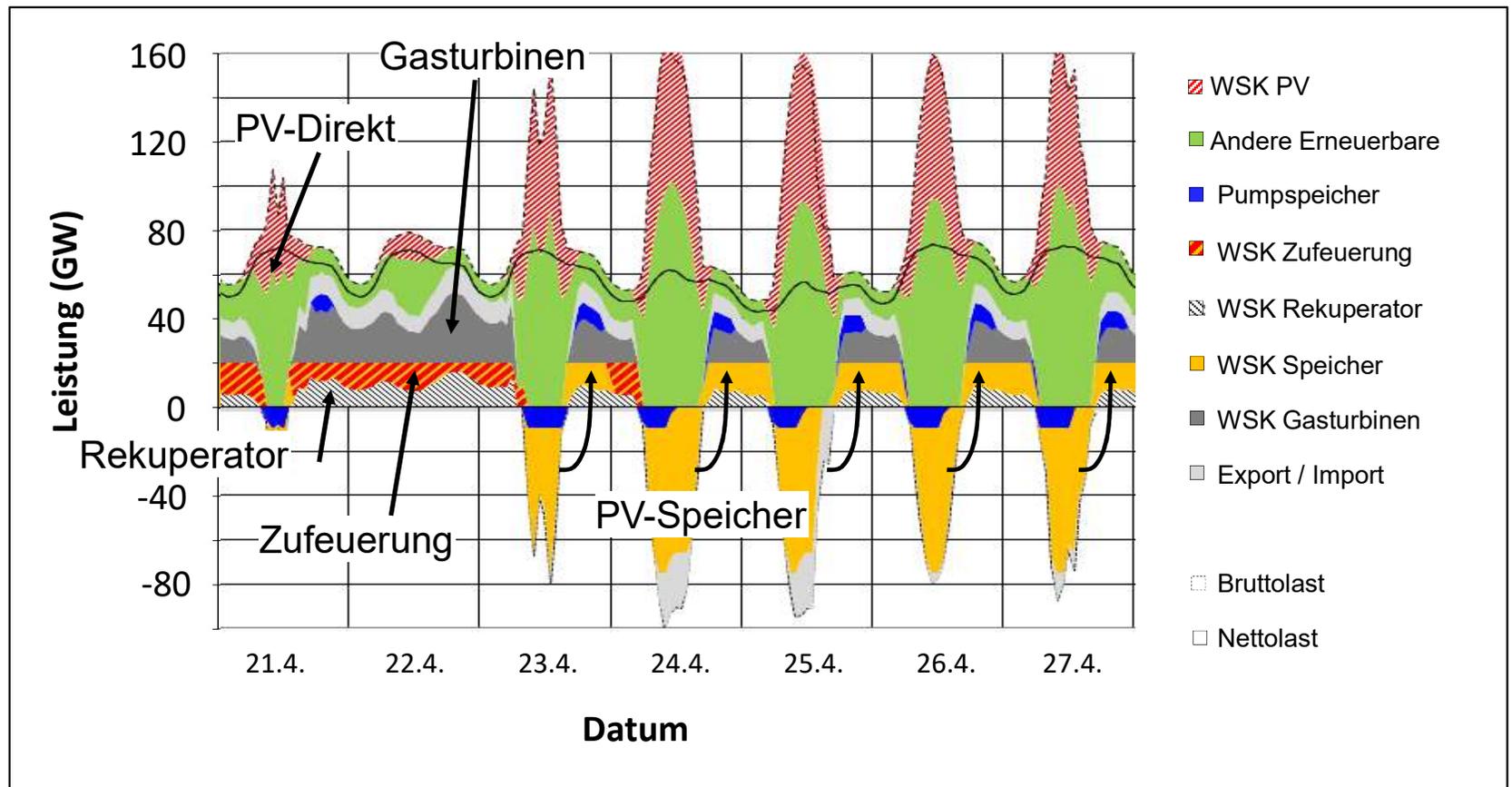
Trieb & Thess 2020
Trieb & Jäger 2022



Wärmespeicherkraftwerke als Residuallastkraftwerke (Basis-Szenario Deutschland 2040)

WSK Konfiguration

DT	21 GW
GT	49 GW
PV	105 GW
TES	600 GWh _{th}
EH	69 GW



Trieb & Thess 2020
Trieb & Jäger 2022



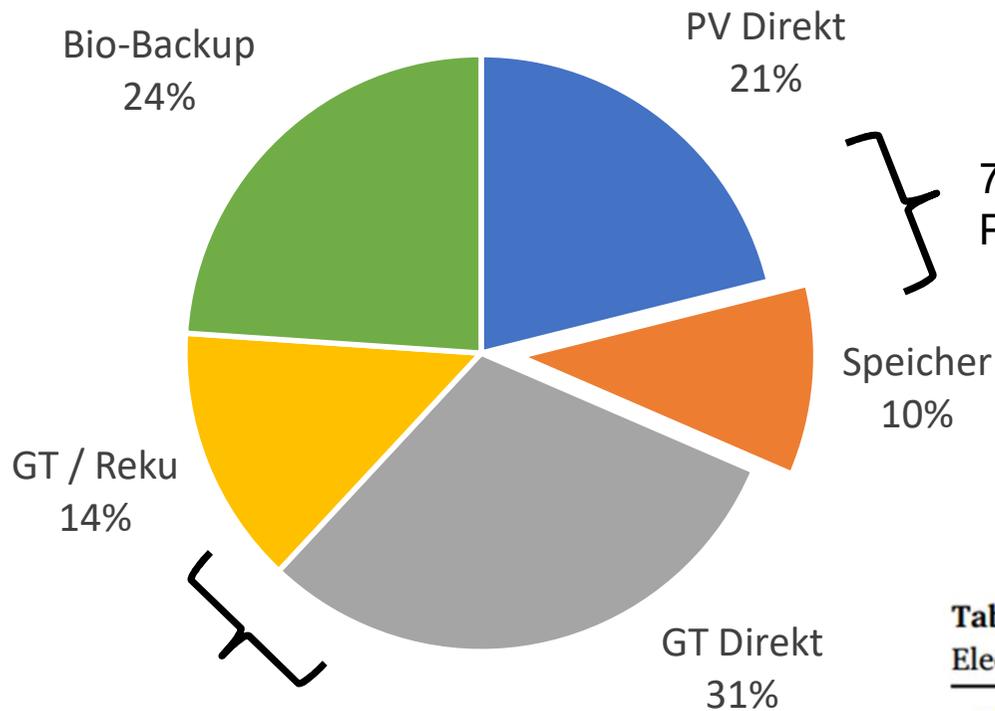
WSK Langfristszenarien

WSK-Stromszenario (2020) / WSK-Sektorenkopplung (2023), Zieljahr 2040/45

- WSK mit Solar- und Bioenergie.
- Ausbau der Netzverbundkapazitäten bis ca. **30/40 GW**.
- **6/11 TWh/a** Abregelung (**1%**)
- **30/60 TWh/a** Stromäquivalente aus Netzimport.
- Stromkosten steigen um **5-10%**.
- Versorgungsinfrastruktur bleibt, Energieträger wechseln (Kohle → Biokohle, Erdgas → Biomethan).
- Nettoengpassleistung konstant bei **102%** der Spitzenlast (Last **85/140 GW**, Residuallast **70/110 GW**).
- Normale Blackout-Risiken, erhöhte Flexibilität



Anteil der WSK-Komponenten an der Residuallast 2040 (ca. 1/3 des Strombedarfs)



Abregelung Gesamtnetz = 6 TWh/a (1%)

70% der mit den WSK zugebauten PV-Leistung geht in die Residuallast

Spezifischer Brennstoffverbrauch der WSK für die Deckung der Residuallast entspricht einem Wirkungsgrad von 67% (Biogas heute ca. 35% für Grundlast)

über 50% Wirkungsgrad bei Spitzenlast

Table 3

Electricity yield of storage plants for the model year 2040.

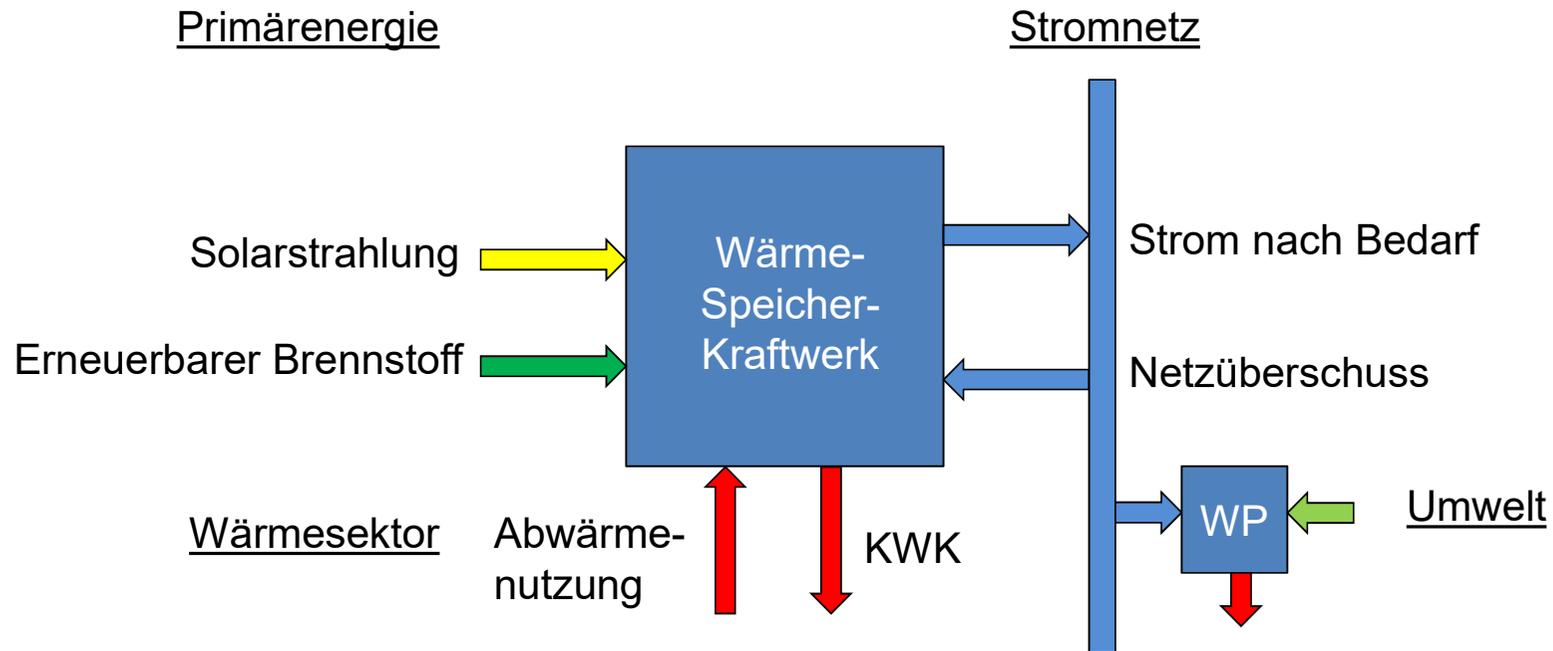
Photovoltaic Power Supplied Directly	45	TWh/a
Steam Turbines via Biomass Backup	51	TWh/a
Steam Turbines via Stored PV	22	TWh/a
Steam Turbines via Heat Recovery	30	TWh/a
Gas Turbines	65	TWh/a
Total Electricity Supplied	213	TWh/a



Gibt es eine befriedigende Lösung für Dunkelflauten und Abregelung?



- Sichere, flexible und erneuerbare elektrische Leistung für die Dunkelflauten
- Nutzung von Stromüberschuss statt Abregelung



Potenzielle WSK-Betreiber

1. Bioenergie-Betreiber:

1. Flexibilität (Strom nach Bedarf und Wärme nach Bedarf)
2. Effizienz (stark reduzierter spez. Brennstoffverbrauch)
3. Mehrwert (Netzdienlichkeit, Speicherfunktion)

} + 100 TWh/a Bio-Strom
(ohne Energiepflanzen)

2. Photovoltaik-Betreiber:

1. Flexibilität (Deckung der Residuallast)
2. Effizienz (Vermeidung der Abregelung)
3. Mehrwert (Netzdienlichkeit, Speicherfunktion)

} + 160 TWh/a PV-Strom
(ohne Überschüsse)

3. Kraftwerks-Betreiber:

1. Erneuerbare Primärenergie (statt fossiler Brennstoffe)
2. Flexibilität (Standby bis Grundlast statt „Flexibilitäten“)
3. Lokale Nettoengpassleistung (statt Importabhängigkeit)

} 70 GW Nettoengpassleistung
(ohne CO₂-Strafzahlungen)



Verzerrungen erschweren die Markteinführung von WSK:

1. Kompensationszahlungen für abgeregelten Strom machen die Vermeidung von Abregelung unnötig und die Abregelung wirtschaftlich akzeptabel.
2. Subvention vermeintlicher „Konkurrenztechnologien“ wie z.B. Wasserstoffkraftwerke durch direkte Unterstützung oder z.B. durch Verzicht auf Netzentgelte führt Unternehmer in nur diese Richtung.
3. „Bilanzielle“ Überbrückung von Dunkelflauten mit angeblich erneuerbarem Strom, der aber tatsächlich zu anderen Zeiten produziert wurde, macht die reale Überbrückung unnötig.

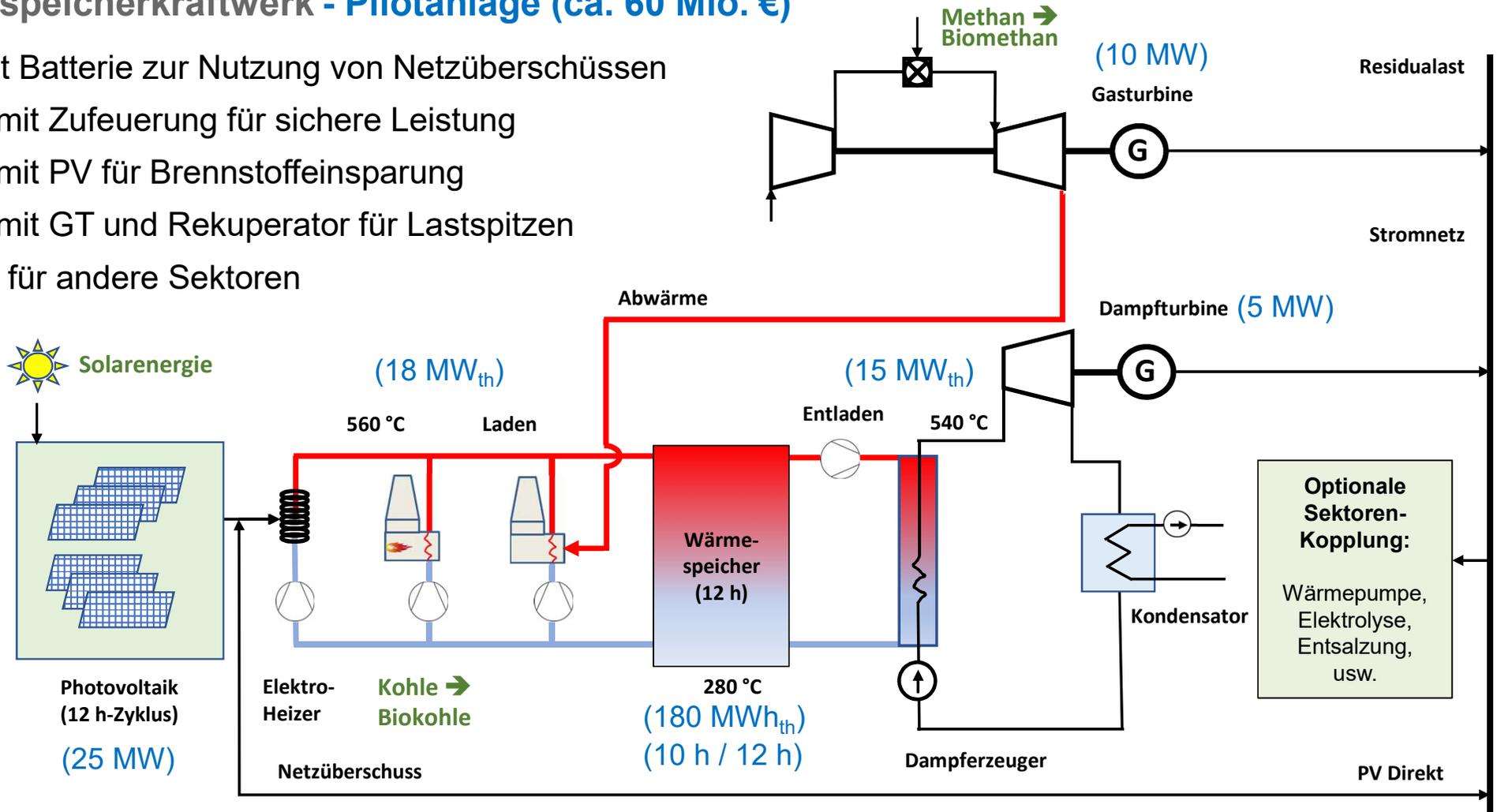
Diese Verzerrungen machen WSK zwar nicht teurer, aber vermeintliche „Alternativen“ attraktiver, und suggerieren Unternehmern, die Probleme „Abregelung und Dunkelflauten“ gar nicht lösen zu müssen.

- ➔ WSK brauchen voraussichtlich keinerlei Subventionen, weil sie mit Abstand die kostengünstigste Lösung für die Deckung der Residuallast sind, aber eine Pilotanlage ist angesichts solcher Verzerrungen notwendig, um deren Vorteile unter realen Bedingungen nachzuweisen.



Wärmespeicherkraftwerk - Pilotanlage (ca. 60 Mio. €)

1. Carnot Batterie zur Nutzung von Netzüberschüssen
2. WSK mit Zufeuerung für sichere Leistung
3. WSK mit PV für Brennstoffeinsparung
4. WSK mit GT und Rekuperator für Lastspitzen
5. Strom für andere Sektoren



Nachweis folgender Funktionen und Merkmale einer WSK-Pilotanlage

Aufnahme von Stromüberschüssen zur Netzentlastung, ohne wirtschaftlich darauf angewiesen zu sein.

Wirtschaftlicher Betrieb durch Aufteilung in Mittellast-Dampfturbinen und Spitzenlast-Gasturbinen.

Jederzeit sichere Leistung in voller Höhe der installierten Kapazität durch Einsatz von Brennstoffen.

Flexibler Betrieb von Mittellast-Dampfturbinen und Spitzenlast-Gasturbinen mit Wärmespeicher ...

... u.a. auch für Stand-by ohne Brennstoffverbrauch und zur Entkopplung von Brennern und Last.

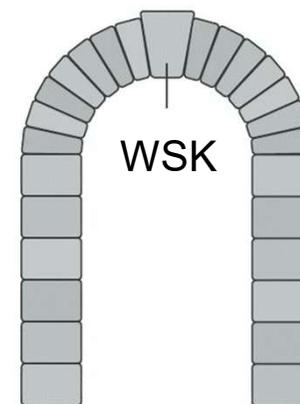
Bis zu 100% erneuerbare Stromerzeugung auf der Basis von Bio- und Solarenergie.

Sparsamer Brennstoffverbrauch durch PV-Einkopplung und Rekuperator.

Netzdienlichkeit durch rotierende Masse und Blindleistung.

→ **WSK sind effiziente, flexible und erneuerbare Kraftwerke**

→ **WSK sind der Schlüsselstein der Energiewende**



Publikationen der Arbeitsgruppe WSK des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt

2023

Trieb, F., Thess, A., Wärmespeicherkraftwerke und Carnot Batterien im zukünftigen Strommix, Energiewirtschaftliche Tagesfragen 73. Jg. (2023) Heft 11.

Trieb, F., Jäger, J., Geyer, M., Thess, A., Thermal Storage Power Plants and Carnot Batteries in Future Power Supply Systems, Energy Storage – Powering Net Zero Event, IET Digital Library, Glasgow, November (2023).

Trieb, F., Jäger, J., Geyer, M., Koll, G., Liu, P., Thermal Storage Power Plants – Key for transition to 100% renewable energy, Journal of Energy Storage, Vol. 74, Part A, (2023) 109275, <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109275>

Liu, P., Trieb, F., First Approach of the German Atlas of Thermal Storage Power Plants (TSPP), Journal of Energy Storage, Vol. 72, Part D (2023) 108603
<https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108603>

Trieb, F., Wärmespeicherkraftwerke – Ein Weg zu 100% erneuerbarem Strom, Lectures for Future, Vorlesung HM und LMU München, 05.06.2023

Trieb, F., Koll, G., Jäger, J., Brennstoffverbrauch verschiedener Lösungen zur Deckung der Residuallast im Vergleich, Energiewirtschaftliche Tagesfragen 5 (2023)

2022

Trieb, F., Jäger, J., Wärmespeicherkraftwerke – Ein Pfad zu einhundert Prozent erneuerbarer Stromversorgung, Energiewirtschaftliche Tagesfragen 72. Jg. (2022) Heft 5, <https://elib.dlr.de/186886/>

Liu, P., Trieb, F., Cost comparison of thermal storage power plants and conventional power plants for flexible residual load coverage, Journal of Energy Storage, Vol. 56, Part B, (2022), <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106027>

Trieb, F., Liu, P., Koll, G., Thermal Storage Power Plants (TSPP) - Operation modes for flexible renewable power supply, Journal of Energy Storage 50 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104282>

Geyer, M., Giuliano, S., Conversion of Existing Coal Plants Into Thermal Storage Plants, Encyclopedia of Energy Storage, Vol. 2, 2022, 122-132, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819723-3.00117-7>

Geyer, M., Prieto, C., Storing Energy in Molten Salts, Chapter in Storing Energy (Second Edition) with Special Reference to Renewable Energy Sources (2022), 445-486, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824510-1.00012-X>



Publikationen der Arbeitsgruppe WSK

2021

Liu, P., Trieb, F., Transformation of the electricity sector with Thermal Storage Power Plants and PV – a first conceptual approach, Journal of Energy Storage 44 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103444>

Trieb, F., Wärmespeicherkraftwerke – Ist ein erneuerbarer Stromanteil von 90% bis 2040 machbar und bezahlbar? Energiewirtschaftliche Tagesfragen 71. Jg. (2021) Heft 5, <https://elib.dlr.de/185482/>

Trieb, F., StoreToPower Phase 1 – Machbarkeitsstudie. Abschlussbericht: 3. Iteration – Transformationspfade der deutschen Stromversorgung mit Wärmespeicherkraftwerken, DLR (2021)

2020

Trieb, F., Thess, A., Storage plants – a solution to the residual load challenge of the power sector? Journal of Energy Storage 31 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101626>

Trieb, F., Geyer, M., Koll, G., Wärmespeicherkraftwerke – Ein Lösungsansatz für das Residuallastproblem im Stromsektor, Energiewirtschaftliche Tagesfragen 70. Jg. (2020) Heft 11, https://elib.dlr.de/147678/1/PDF_18062_et_11_2020_S.10-15.pdf

Geyer, M., Giuliano, S., Trieb, F., Repurposing of existing coal-fired power plants into Thermal Storage Plants for renewable power in Chile. Final Report and Executive Summary. DLR/GIZ (2020), <https://docslib.org/doc/7708822/repurposing-of-existing-coal-fired-power-plants-into-thermal-storage-plants-for-renewable-power-in-chile>

Trieb, F., Wärmespeicherkraftwerk Jänschwalde - Phase 1 – Grobanalyse - Teil 1 – Systemanalytische Vorbetrachtung, Abschlussbericht DLR/LEAG (2020)



Das WSK Team

Dipl.-Ing. MBA
Gerrit Koll



gerrit.koll@dlr.de

Dr. rer. nat. Dipl.-Ing.
Franz Trieb



franz.trieb@dlr.de

Dipl. Geoökologin
Judith Jäger



judith.jaeger@dlr.de

Dr.-Ing.
Michael Geyer



m.geyer@dlr.de

MSc.
Pai Liu



pai.liu@dlr.de

MSc.
Philipp Trompetter



philipp.trompetter@dlr.de

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Technische Thermodynamik (TT)
Arbeitsgruppe Wärmespeicherkraftwerke
Pfaffenwaldring 38-40
D-70569 Stuttgart
Germany



Fragen?

