



Transformation der Energiesysteme 2010-2050

Teil III

Versorgungssicherheit und Integration von fluktuierenden erneuerbaren Energien



Übersicht

- Repetitorium der letzten Vorlesung
- Betrachtungen zur Photovoltaik (Restanz von Teil 2)
- Was heisst Versorgungssicherheit im Stromsektor?
- Wie funktioniert der Strommarkt?
- Versorgungssicherheit und Systemintegration

Erneuerbare Energien verändern die Welt radikal

Energieverbrauch, Risiken und Emissionen sinken auf zwei Wegen:

1. Reduktion der Umwandlungsverluste und Emissionen in der Stromerzeugung

Solar- und Windkraftwerke ohne Abwärme und ohne Emissionen im Betrieb verdrängen Kohle-, Gas- und Atomkraftwerke

2. Reduktion der Umwandlungsverluste durch Verdrängung in bisher nicht elektrifizierten Sektoren

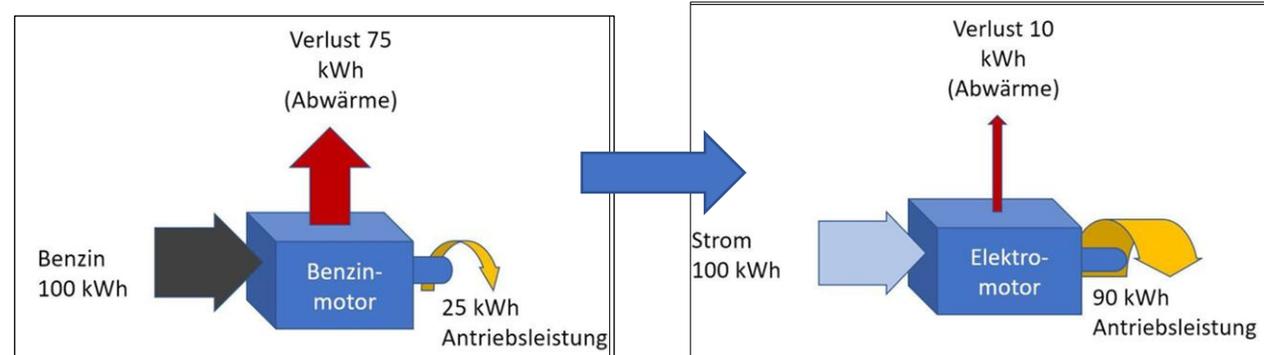
E-Mobilität
Wärmepumpen
Industrielle Prozesse (zB. Dünger aus grünem Ammoniak)

Die Nutzenergie (Wärme, Mobilität usw.) verändert sich dadurch nicht!



Wärmepumpen statt fossile Heizungen:

60-80% der Wärme aus Umweltwärme



Verzicht auf fossile Verbrennungsmotor

Verluste 65-70%

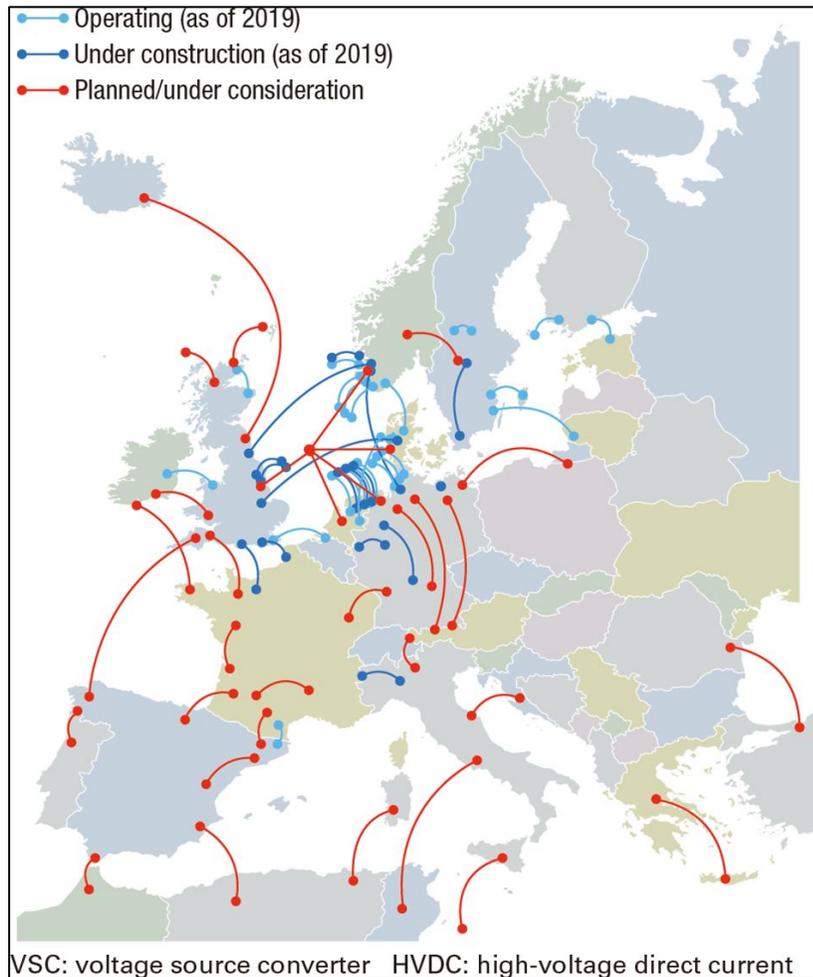


Keine thermischen Verluste



Stilllegung Thermische Kraftwerke (Kohle/Atom/Gas) dank Erneuerbaren neuen Speichern

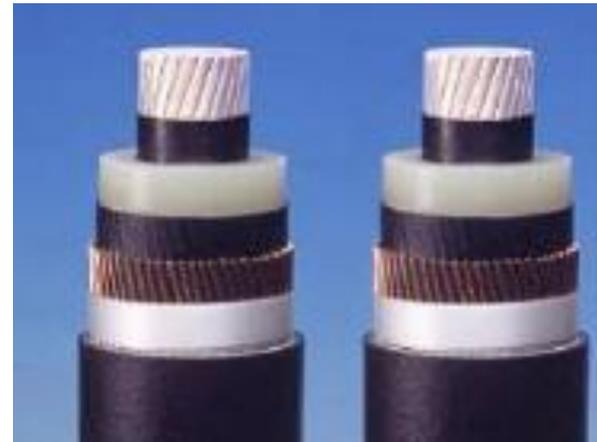
Marktöffnung, Stromhandel und koordinierter Netzausbau: Ausgleichseffekte, Reduktion der Reservehaltung, Erschliessung enormer neuer Potenziale



EU- Strombinnenmarkt verbessert die Bedingungen:

- Offener Handel
- Koordinierte Netzplanung & Ausbau
- Marktzugang erleichtert Verwertung von Stromüberschüssen
- Ausgleichseffekte dank grosser Perimeter senkt Kosten/steigert Erlöse
- Neue effizientere Netztechnologien mit Gleichstrom

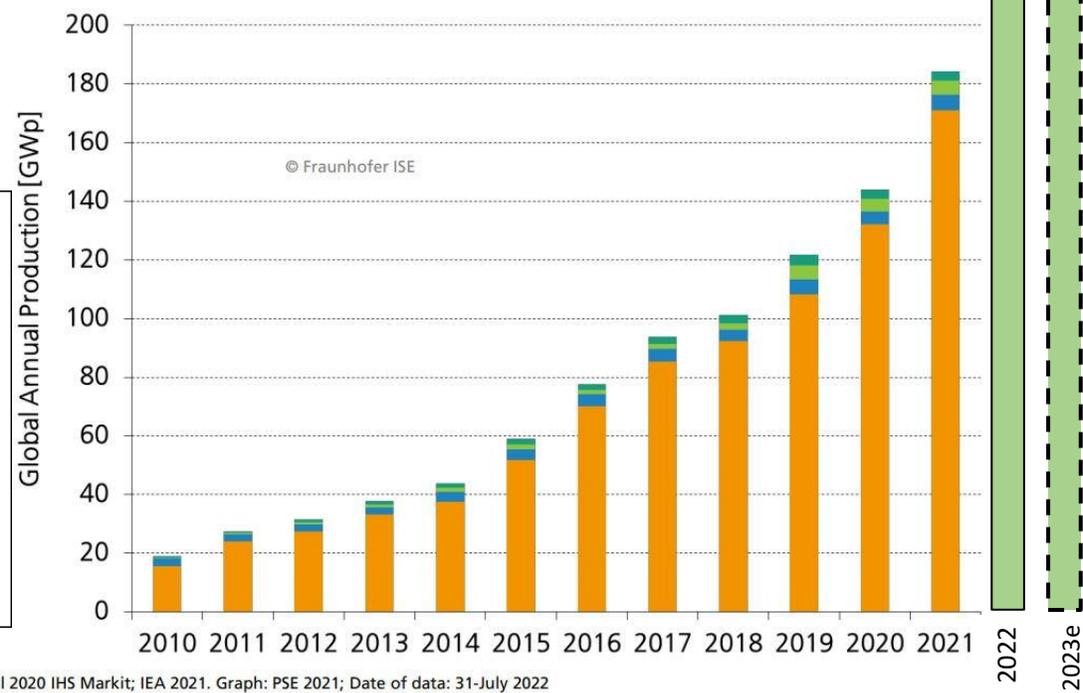
Figure 1-B. Left powerline: The Pacific Direct Current Intertie (PDCI), near Bishop, CA. HVDC, 3,000 MW, +/- 500 kv bipole, 846 miles from Celilo, at The Dalles Dam, OR to Sylmar (NW Los Angeles, CA). Commissioned in 1970 as 1,500 MW line. The right powerline is conventional high voltage AC.



Wechselstrom

Gleichstrom

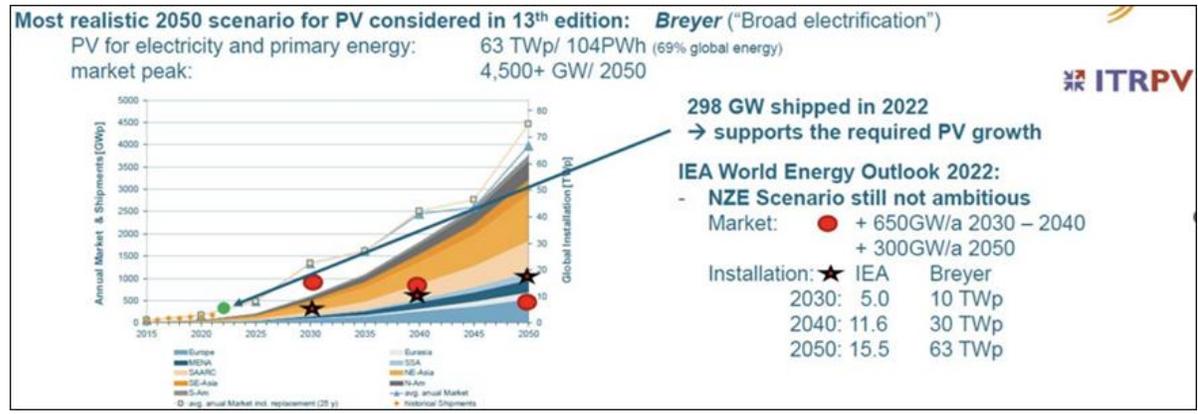
Explosionsartige Zunahme von Photovoltaik und Batterien weltweit führen zur Disruption der Energiewirtschaft



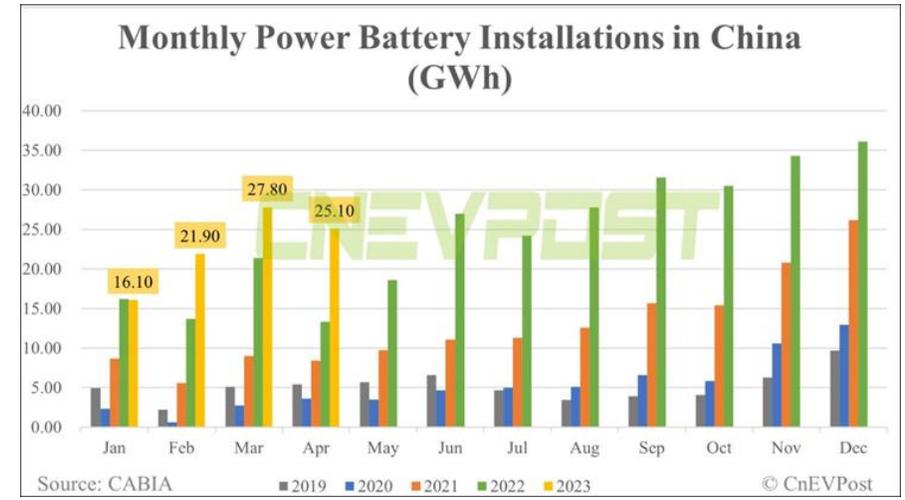
Data: Until 2020 IHS Markit; IEA 2021. Graph: PSE 2021; Date of data: 31-July 2022

Faustregel: 8 GW solar liefert eine Stromproduktion entsprechend 1 GW Bandenergie (AKW «Gösgen» oder 2 Kohlekraftwerke à 500 MW)
400 GW zusätzlich in einem Jahr entsprechen 50 AKWs «Gösgen»

International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) geht davon aus, dass im Jahre 2050 69% der gesamten verbrauchten Energie aus PV stammt. IEA muss konservative Prognosen laufend nach oben korrigieren



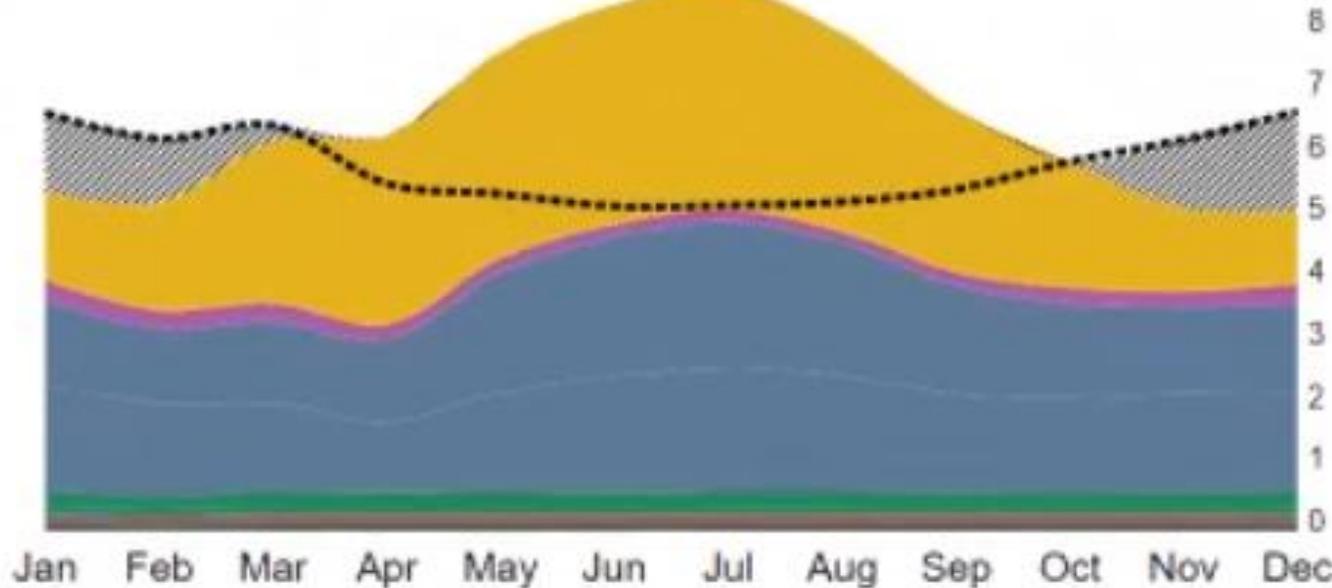
Disruption: Sprunghafte Zunahme Batterien (Bsp. China)



Neue Zielmatrix Schweiz 2050: Energieverbrauch elektrifiziert, AKWs stillgelegt

Szenario 2050: maximale Versorgungssicherheit

Minimierung
Winterlücke dank PV



Quelle: Axpo Power Switcher

- **Atomkraft verschwindet**
- **PV, Wasserkraft, wenig Wind & Biomasse sowie Stromaustausch decken den Bedarf**
- **Pflichtlager (Wasserkraft & vorerst Erdgas, später Biomethan)**
- **Versorgungssicherheit als Geschäft:**
- **Billige Importe nach CH bei starkem EU-Wind/Sonne**
- **Ertragsstarke CH-Exporte bei Knappheit im Ausland**

Übersicht

- Repetitorium der letzten Vorlesung
- Betrachtungen zur Photovoltaik (Fortsetzung von Teil 2 der Vorlesung)
 - Vertiefung Technische Entwicklung Photovoltaik (PV)
 - Unterschiedliche Märkte und Abnehmer
 - Zusammenspiel mit Windkraft
- Was heisst Versorgungssicherheit im Stromsektor?
- Wie funktioniert der Strommarkt?
- Versorgungssicherheit und Systemintegration

Enorme technische Erfolge



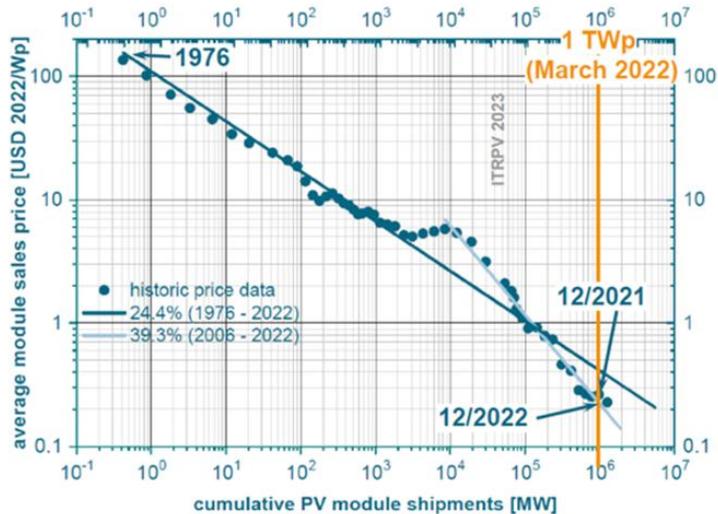
AukeHoekstra
@AukeHoekstra

Learning in solar production (Swansons' Law) is not slowing down but speeding up!

We often say every doubling of production lowers solar module prices by 20% but from 1976 to 2022 it was 24.4% and from 2006 to 2022 it was 39.3%

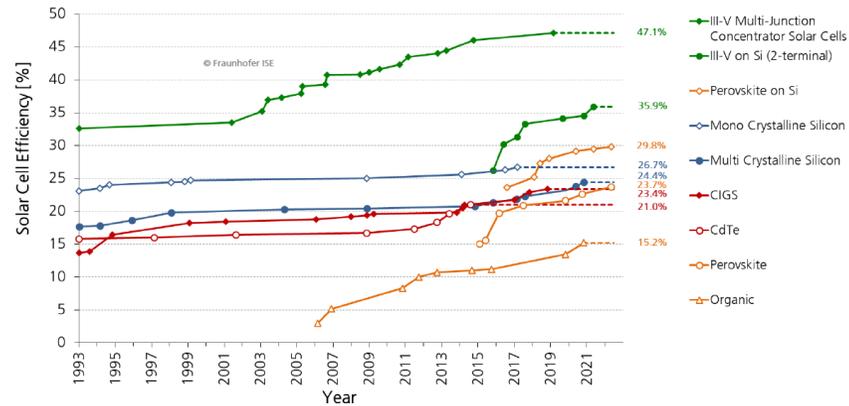
Solar is becoming incredibly cost effective.

[Tweet übersetzen](#)



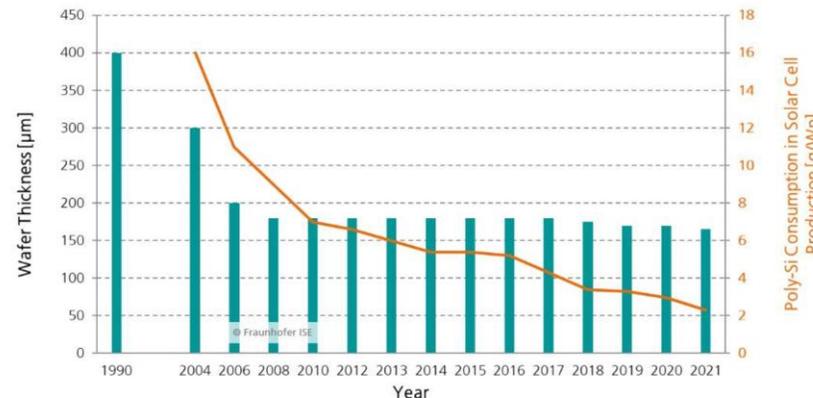
09:47 · 20.06.23 aus Earth · 9'903 Mal angezeigt

Development of Laboratory Solar Cell Efficiencies



Data: Solar Cell Efficiency Tables (Versions 1 to 60), Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 1993-2022. Graph: Fraunhofer ISE 2022. Date of data: May 2022

c-Si Solar Cell Development Wafer Thickness [µm] & Silicon Usage [g/Wp]



Data: until 2012: EU PV Technology Platform Strategic Research Agenda, from 2012: ITRPV 2015; ISE 2016 without; 2017 to 2020 with recycling of Si. Graph: PSE Projects GmbH 2021

Beispiele für technischen Fortschritt in der Photovoltaik:

- Stetige Verbesserung Wirkungsgrad (W/m²)
- Siliziumschicht sinkt von 16 g/W auf 2 g/W (2004-2021)
- Preise sanken mit jeder Verdoppelung der installierten Leistung um mehr als 20%. (Lernkurventheorie)
- Grosse Bandbreite von neuen Technologien (Perovskit)

Enorme technische Erfolge



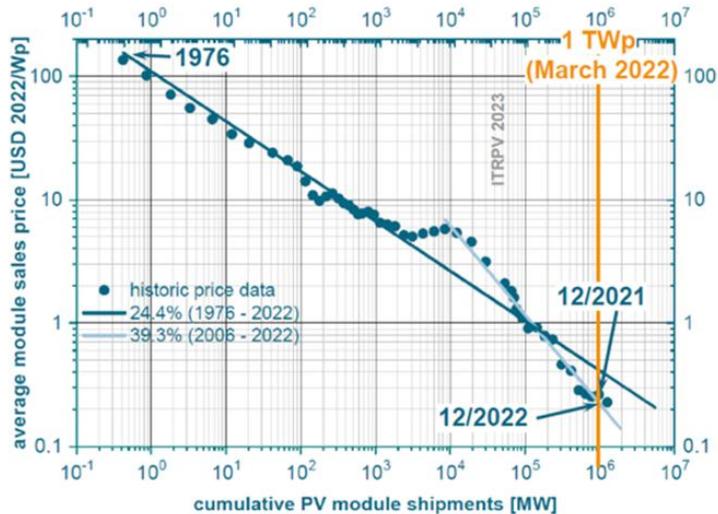
AukeHoekstra
@AukeHoekstra

Learning in solar production (Swansons' Law) is not slowing down but speeding up!

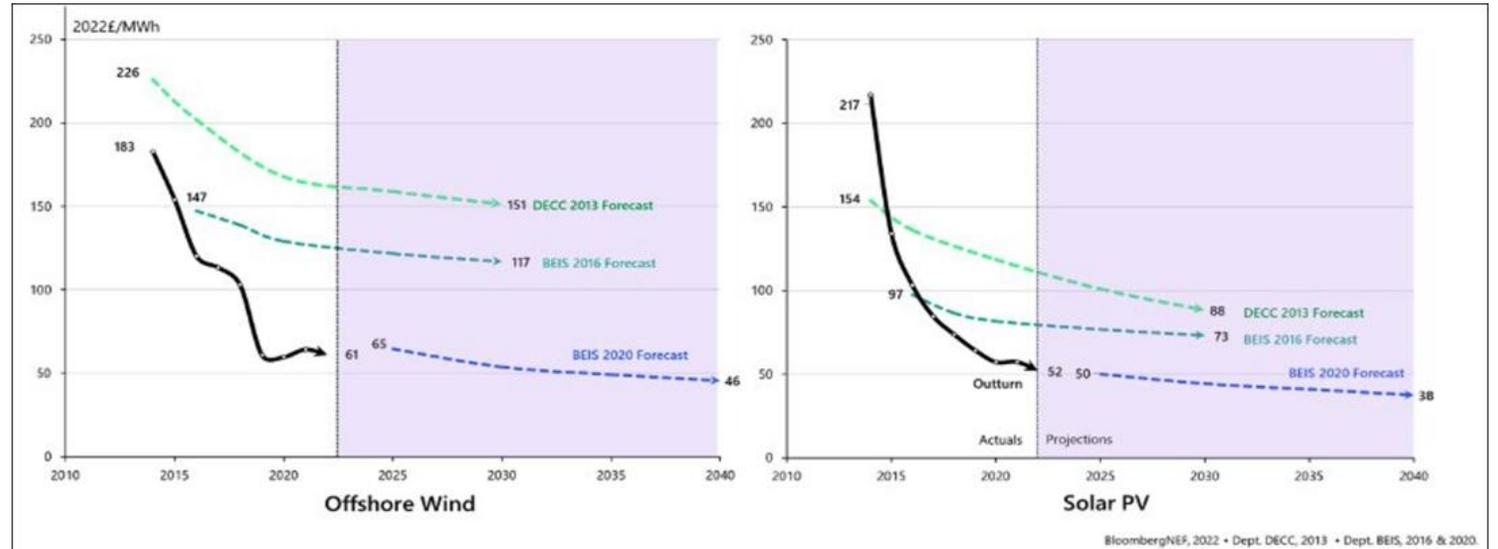
We often say every doubling of production lowers solar module prices by 20%
but from 1976 to 2022 it was 24.4%
and from 2006 to 2022 it was 39.3%

Solar is becoming incredibly cost effective.

[Tweet übersetzen](#)



09:47 · 20.06.23 aus Earth · 9'903 Mal angezeigt



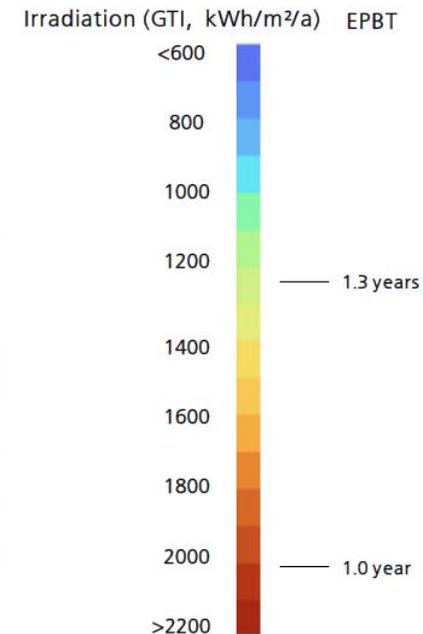
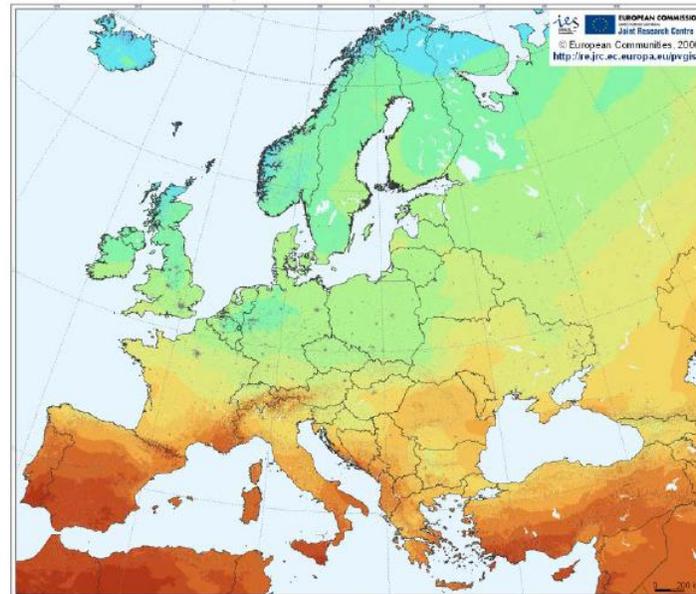
- PV-Preise sanken mit jeder Verdoppelung der installierten Leistung um mehr als 20%. (Lernkurventheorie)
- Preisprognosen für Windkraft und Solarstrom waren notorisch zu pessimistisch (Bild: Beispiel Energiedepartement UK)
- Die notorischen Fehlprognosen verfolgten einen klaren politischen Zweck: Heiligsprechung der Kernenergie

Gute Ökobilanz – Energierücklaufzeit sinkt < 1 Jahr Recycling-Standards gehen Richtung Kreislaufwirtschaft

Energierücklaufzeit gesunken auf 1-1,3 Jahre in Mitteleuropa

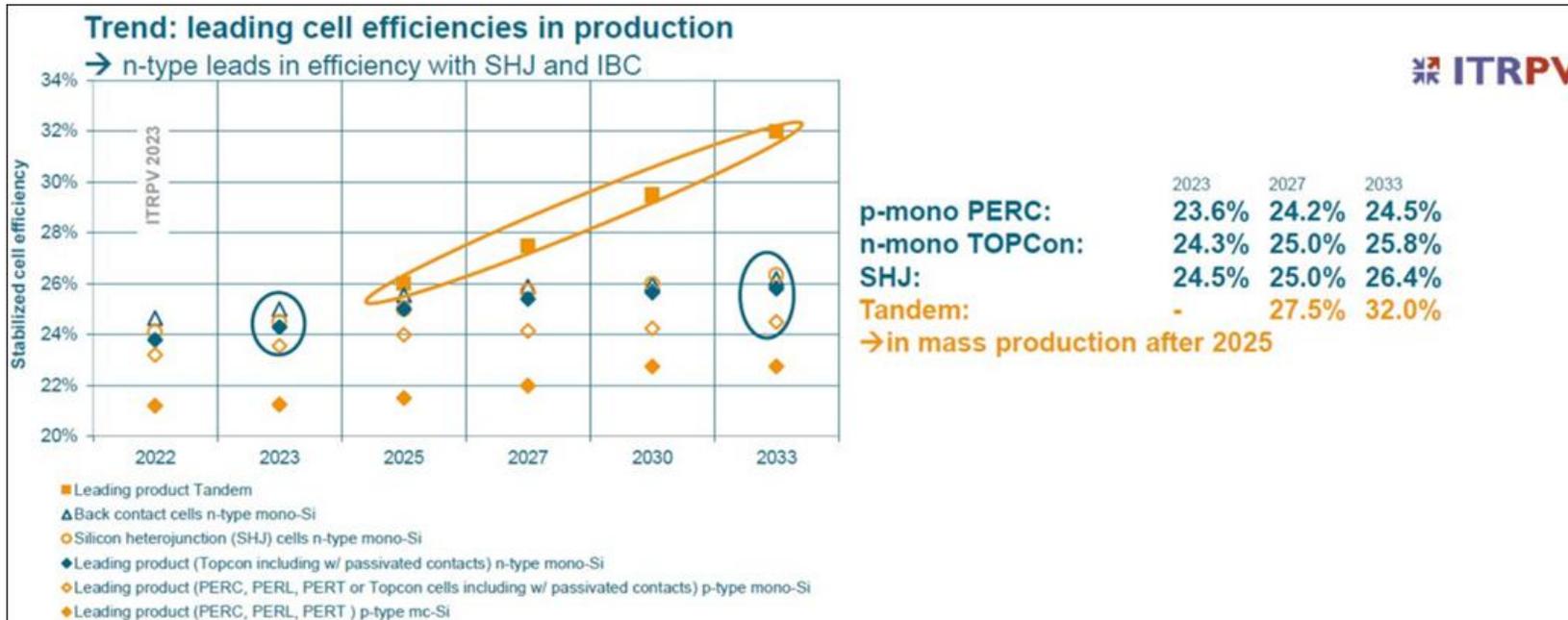
Energy Pay-Back Time of Silicon PV Rooftop Systems Geographical Comparison

- Rooftop PV-system using mono-crystalline Silicon cells* produced in China
- EPBT is dependent on irradiation, but also on other factors like grid efficiency**.
- Better grid efficiency in Europe may decrease the EPBT by typically 9.5 % compared to PV modules produced in China.



Data: Lorenz Friedrich, Fraunhofer ISE. Image: JRC European Commission. Graph: PSE 2020 (Modified scale with updated data from Fraunhofer ISE)

PV-Branchenkonferenz erwartet weitere enorme Steigerung von Effizienz



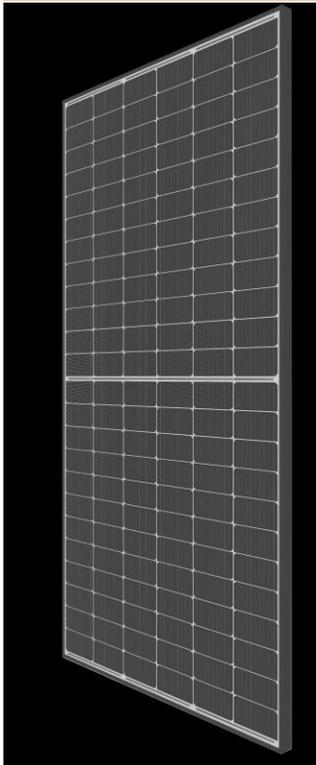
Effizienzverbesserung bedeutet

- weniger Material für Aufständigung
- weniger Platzbedarf
- weniger O&M-Kosten (Operation & Maintenance)
- Kostensenkung

- **Heutige kommerzielle Module erreichen 20-24% Wirkungsgrad:**
 1 kW_{peak}-Leistung beansprucht heute ca. 5 m² Nutzfläche
 - **Bis 2033 wird ein Anstieg auf 26% bei monokristallinen Modulen erwartet:**
 1 kW_{peak}-Leistung beansprucht dann noch ca. 4 m² Nutzfläche
 - **Tandemzellen sollen bis zu 32% Wirkungsgrad aufweisen:**
 dann noch 3 m² Flächenbedarf für 1 kW Leistung
- (1 kW liefert bei uns ca. 960 kWh pro Jahr, Landesdurchschnitt)**

Solarzellen versus Dieselgenerator: Materialverbrauch PV um Faktor 200+ besser als Diesel

Megasol Hochleistungsmodul M560



**Solarmodul mit
560 Wp Leistung
Auf Dach nach
Süden montiert**

**Liefert
in 40 Jahren ca.
20'000 kWh
(960 kWh/kW)**

**31,5 kg
Eigengewicht**

Dieselgenerator



**Verbrauch für dieselbe
Strommenge**

**ca. 6000 kg Diesel +
Material Generator +
Wartung**

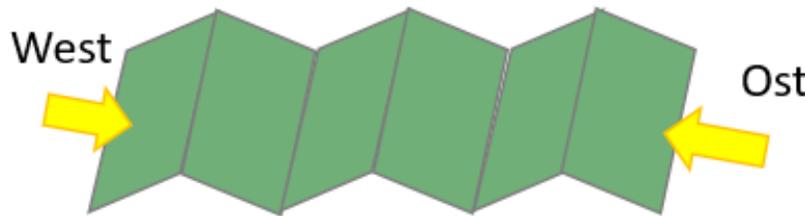
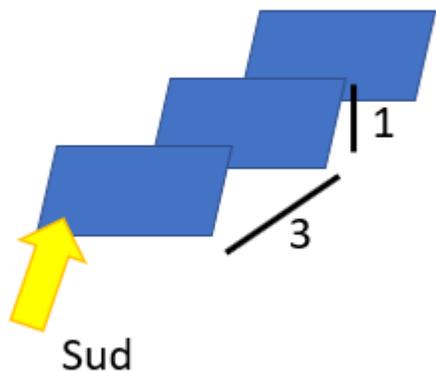
Unterschied
Materialdurchsat
z Faktor 200

Solarmodul lässt
sich zu fast 100%
recyclieren.

Kostensenkung der Hardware ermöglicht dichtere Aufstellung mit weniger Verschattung

Ertragsmaximierende Südausrichtung als PV noch sehr teuer war (0.5- 1.0 CHF/kWh)

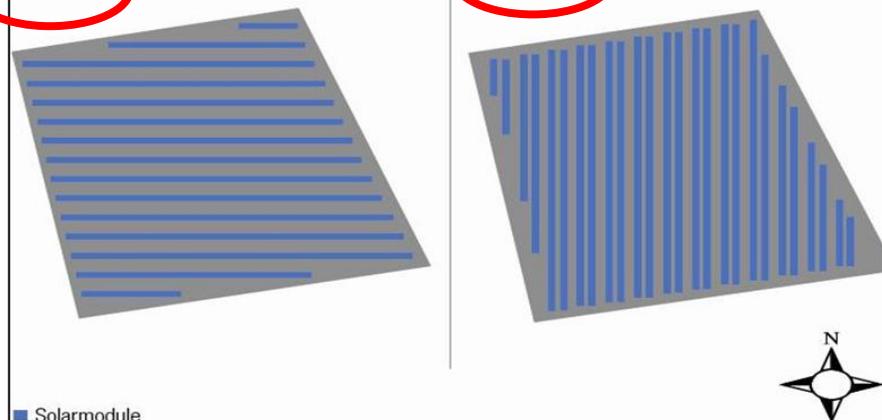
Heute vermehrt Ost-West-Ausrichtung: weniger Verschattung, dichtere Nutzung der Stellfläche



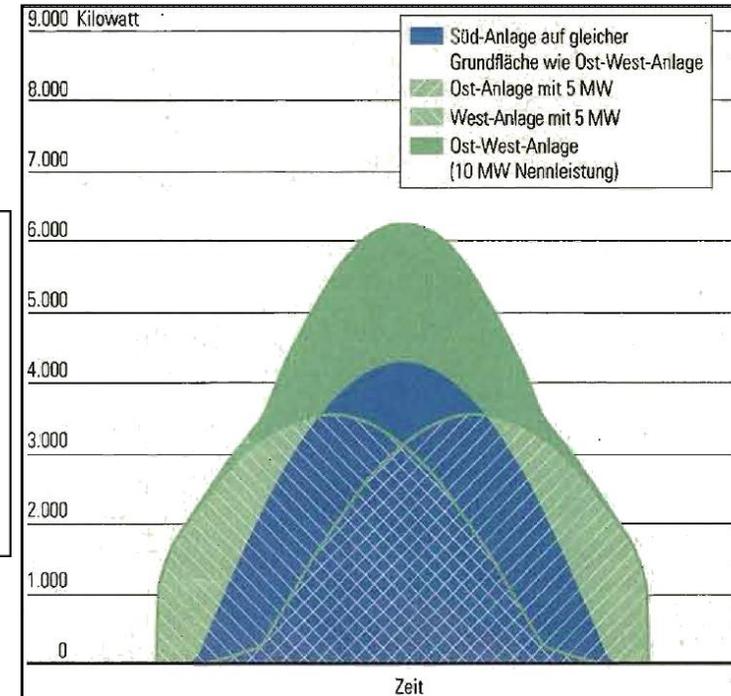
Bessere Flächennutzung in Ost-West-Ausrichtung

800 KW

1,2 MW



Quelle: Photon Solar-Magazin Oktober 2011



**Ost-West-Fächerung (grün):
höherer Ertrag pro Fläche,
breitere zeitliche Verteilung der
Stromerzeugung**

**Mehr Ertrag pro Fläche als bei
Südausrichtung (blau)**

Neue Entwicklung: Bi-faciale Solarmodule, steiler Anstellwinkel: Weniger Flächenverbrauch, mehr Leistung am Tagesrand

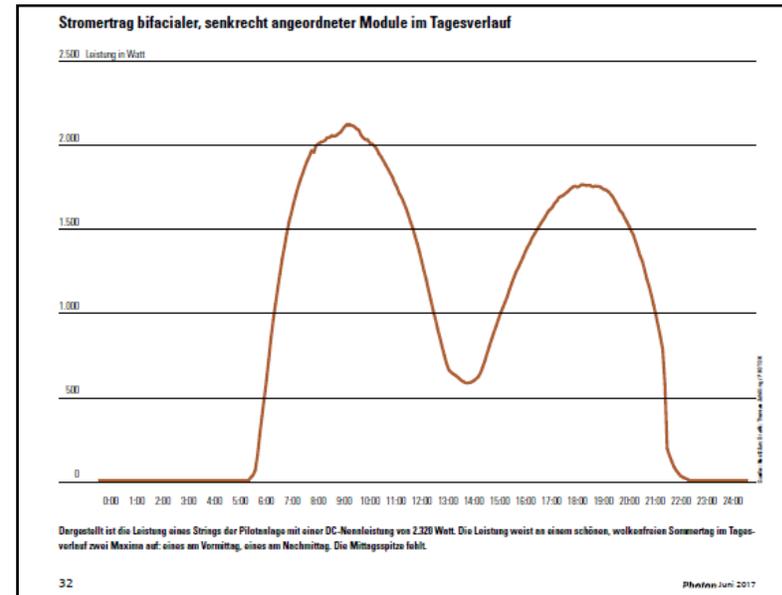


Die Modulreihen stehen mit zehn Metern Abstand zueinander, um Verschattungen zu minimieren. Aus demselben Grund müssen auch die Module selbst seitlich etwas Abstand zum Montagesystem halten.

Vorteile vertikaler Aufstellung Ost-West:

- Kein Flächenverbrauch, Keine Versiegelung
- Mehrertrag
(bis zu 110% v. Südausrichtung, Datenlage allerdings noch schmal)
- Annäherung an Lastkurve morgens/abends

Quelle: Photon Juni 2017



Investitionslogik bei Grossanlagen (utility size): Grosshandel

- Ziel: Wettbewerbsfähigkeit mit Grosshandelspreis für Strom (Kohle/Gas/Kernkraft)
- Kostenreduktion dank Masse, rationelle Bauweise, günstiger Beschaffung
- Zentrale Überwachung der Anlage möglich (elektronisch, Drohnen), «highly protected» gegen Diebstahl
- Nachführsysteme verbreitet
- Netzanbindung auf hohem Spannungsniveau
- zentrale Speicher möglich, spezifisch oft billiger als dezentrale Batterien
- Beliebt in Ländern mit bescheidenem handwerklichem know how (zentraler Betrieb, Unterhalt, Verkauf)



Grossanlagen mit Nachführung: 20 bis 35 % mehr Ertrag bei 5-10% höheren Investitionskosten



Kostensenkung erlaubt Ausweitung der Nutzungsperimeter

zB. Nutzung von Gewässern – Floating PV

Wasserkühlung erhöht Wirkungsgrad, zT. kombiniert mit Pumpspeicher



Multi-use-sites PV/Storage



Schweiz: Anlagen mit viel Winterstrom Anlagen auf Infrastrukturen

Massnahmen für Winterstrom und
Raumersparnis:

- Steiler Neigungswinkel
 - zB. Einbezug Fassaden
- Platzierung im alpinen Raum
 - Alpensüdseite
- Standorte in bereits besiedelten Räumen
 - zB. Stauseen (> 100 km² Fläche!)
 - Skigebiete
 - Flugplätze
- Bifaziale Zellen mit Albedoeffekt bei Schnee
- Generell: Nutzung bestehender versiegelter Flächen und Infrastrukturen

Beispiele: erhöhte Produktion im Winterhalbjahr / Integration in bestehende Infrastrukturen



Abbildung 43 Bi-faziale Solarzellen, vertikal aufgeständert (Bild: Photon)

Abbildung 44 Fassadenanlage Zürich (Bild Solvatec)

Abbildung 45 Fassadenanlage Basel (Bild Solvatec)

Abbildung 46 alpine Anlage Muotas Muragl (Quelle: Muntwyler 2013)⁷⁰

Ausdehnung der Nutzungssperimeters: Beispiele aus der Schweiz

**Das erste schwimmende
Solarkraftwerk im Gebirge geht im
Wallis in Betrieb**



Agri PV: PV über Apfelkultur

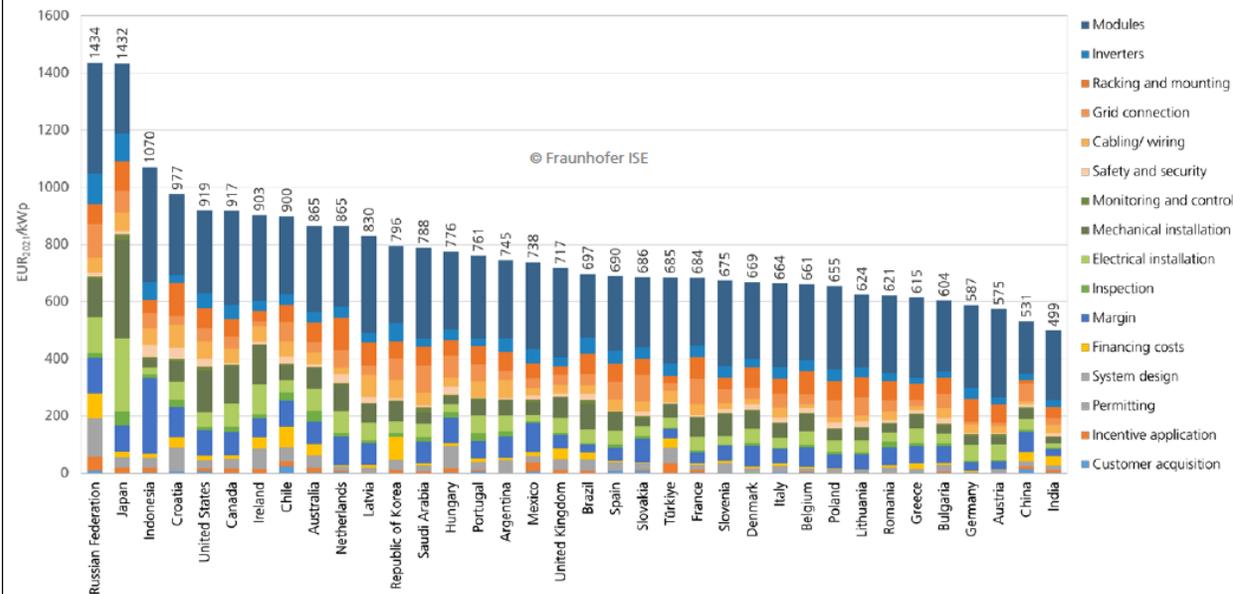


Alpine Solarstromanlage Grengiols
(VS) Visualisierung Vollausbau

Tiefste Gestehungskosten bei utility size Grossanlagen

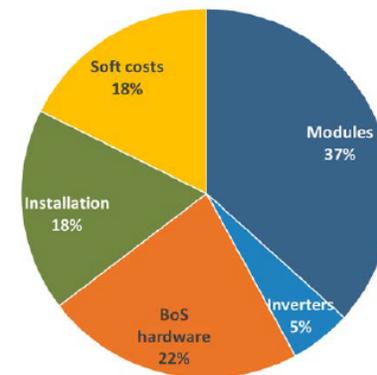
Modulkosten noch 1/3 der Kosten

Breakdown of Utility-scale PV Total Installed Costs By Country in 2021

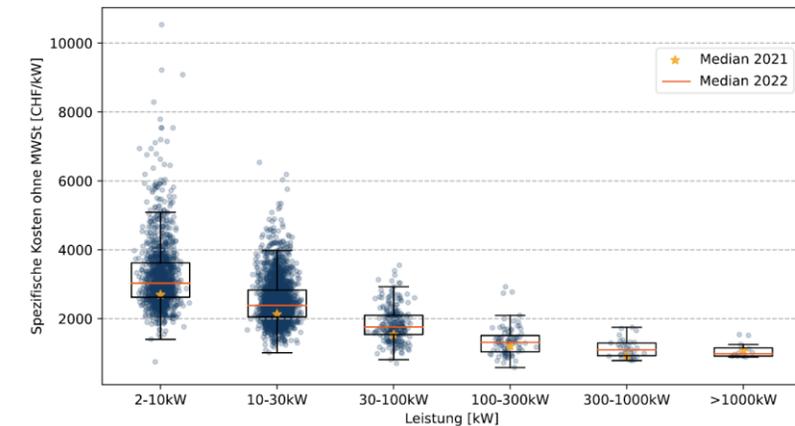


Data: IRENA (2022), Renewable Power Generation Costs in 2021, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Currency converted from USD to EUR. Date of data: Jul-2022

Breakdown of cost components (average of available country data):



Zum Vergleich: Investitionskosten Schweiz 2022



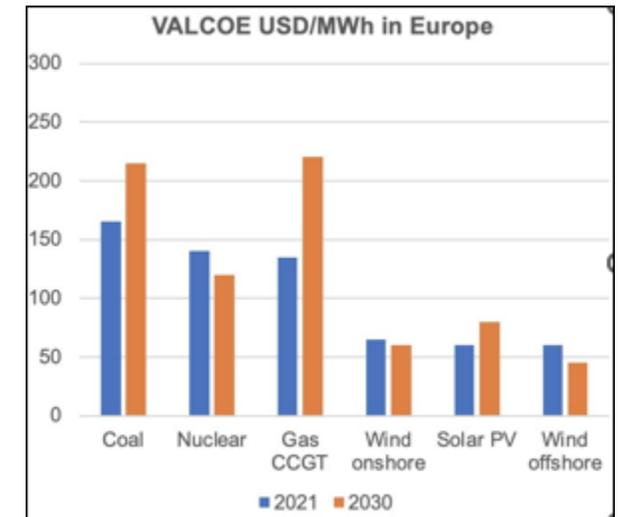
Planair: Kostenbeobachtungsstudie 2022

Grundregeln für die Kosten:

- je grösser die Anlage, desto tiefer die Kosten
- grosse Bandbreite bei einzelnen Anlagen
- «es kommt darauf an»: Einzelfall betrachten!

Auch unter Berücksichtigung der Integrationskosten (z.B. Backup) sind Erneuerbare schon heute billigste Option

	Capital costs (USD/kW)			Capacity factor (%)			Fuel, CO ₂ , O&M (USD/MWh)			LCOE (USD/MWh)			VALCOE (USD/MWh)		
	2021	2030	2050	2021	2030	2050	2021	2030	2050	2021	2030	2050	2021	2030	2050
European Union															
Nuclear	6 600	5 100	4 500	80	80	80	35	35	35	140	120	105	140	120	105
Coal	2 000	2 000	2 000	40	20	n.a.	115	130	140	180	255	n.a.	165	215	n.a.
Gas CCGT	1 000	1 000	1 000	20	10	n.a.	100	120	130	155	270	n.a.	135	220	n.a.
Solar PV	810	530	410	14	14	14	10	10	10	50	35	30	60	80	80
Wind onshore	1 590	1 510	1 450	29	30	30	15	15	15	55	50	45	65	60	60
Wind offshore	3 040	2 000	1 500	51	56	59	15	10	10	60	40	30	60	45	40



LCOE = levelised cost of electricity;

VALCOE = value-adjusted levelised cost of electricity, beinhaltet auch Integrationskosten

Der "Valcoe" spiegelt die wertberichtigten Kosten für Solare- und Windstrom, inclusive Kosten für die Integration wie Speicher, Abregelung, Verwendung in der Sektorkopplung.

Die Berechnungen der konservativen und nuklear-lastigen IEA zeigen, dass die erneuerbaren Energien auf der ganzen Linie inzwischen die billigste Option sind.

Quelle: IEA World Energy Outlook 2022

Investitionslogik von Dachanlagen und Fassaden: (Gewerbe, Industrie, Dienstleistungen): Eigenverbrauch



**Nutzung auf
Dienstleistungs-
gebäuden**

IKEA, Walmart:
Rentabelste Standorte auf Gebäuden mit
Dienstleistern, die den Kleinverbrauchertarif
bezahlen

Rooftop solar boomt aus guten Gründen:

- Ausweidlösung, wenn Netzausbau stockt oder Netze bereits ausgelastet sind.
- Kein Netzausbau erforderlich,
- Batterien erweitern oft das Nutzungsspektrum



**Nutzung auf
Industriedächern**

Beispiel Brauerei Heineken (Holland)

- Härtere Bedingungen für Wirtschaftlichkeit:
Industrie-Stromtarife werden oft künstlich tief gehalten

Rooftop solar: selbst für Schwerindustrie wirtschaftlich!



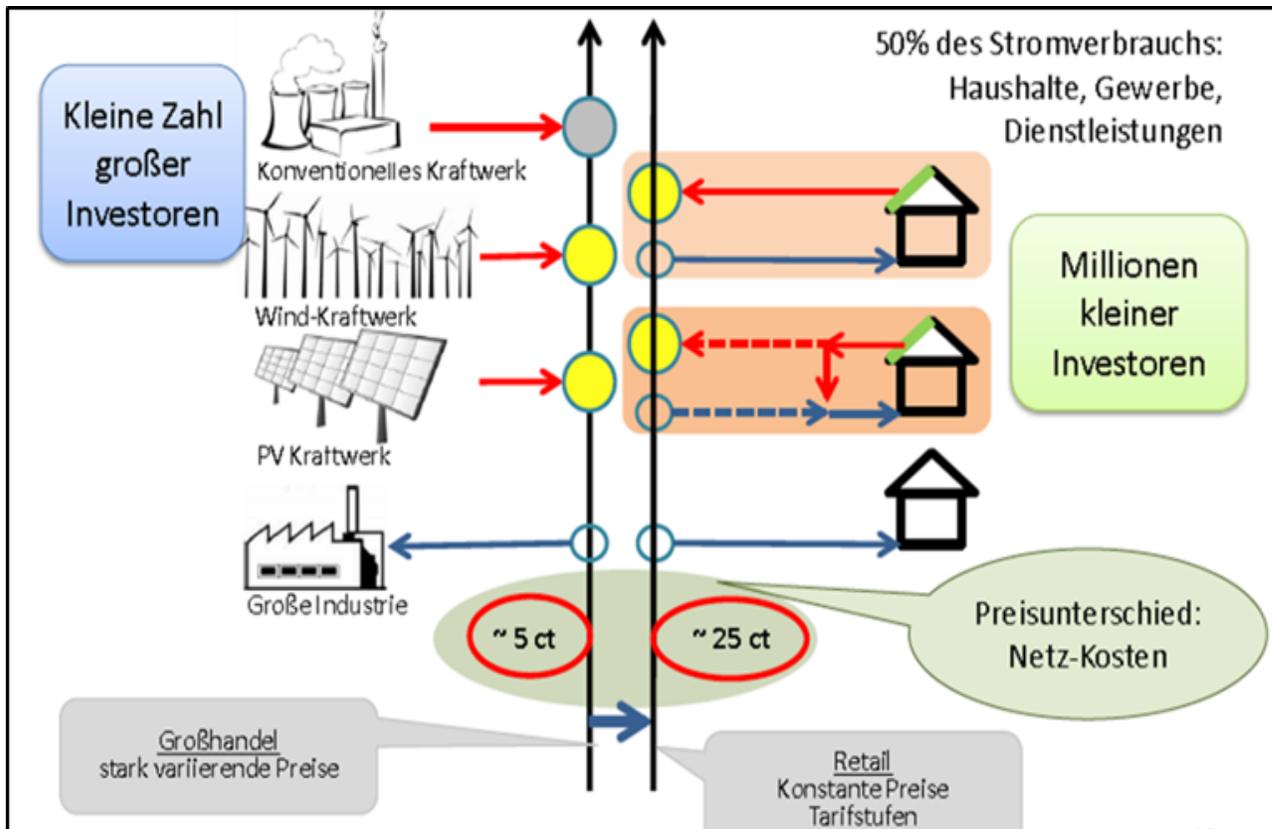
Leichtbau-Unterkonstruktion für mehr Traglast

Die Anlage wird auf einem leicht geneigten Blechdach montiert. Die Monteure wählten eine besondere Leichtbau-Unterkonstruktion, um die maximale Traglast des riesigen Dachs einzuhalten. Aufgrund der Anlagengröße wird der regionale Energieversorger die Anlage direkt in sein Leitsystem integrieren, teilt ADEV mit.

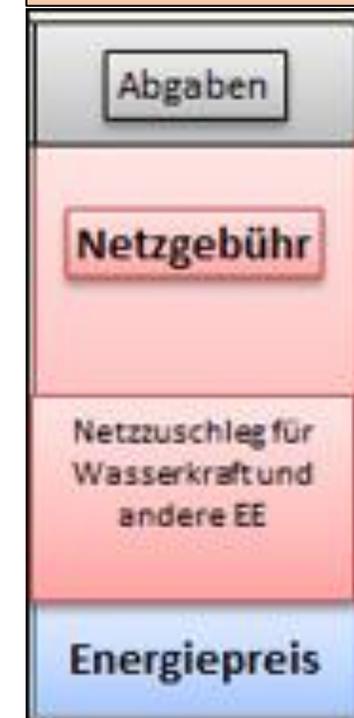
Stahl Gerlafingen produziert jährlich etwa 700.000 Tonnen Bewehrungs- und Profilstahl. Die AFV Beltrame Group aus Italien ist Eigentümerin des Schweizer Stahlwerks und hat sich zum Ziel gesetzt, ihre Klimaemissionen bis 2030 um 40 Prozent zu vermindern. Dafür braucht es mehr Ökostrom, um die Stahlproduktion nachhaltiger zu machen. (nhp)

Investitionslogik dezentraler Kleinanlagen: Eigenverbrauch, Mobilität, Speicher zur Lastverschiebung (Wärme & Strom)

Strom dezentral vom eigenen Solardach ist inzwischen billiger als Strom von der Steckdose.



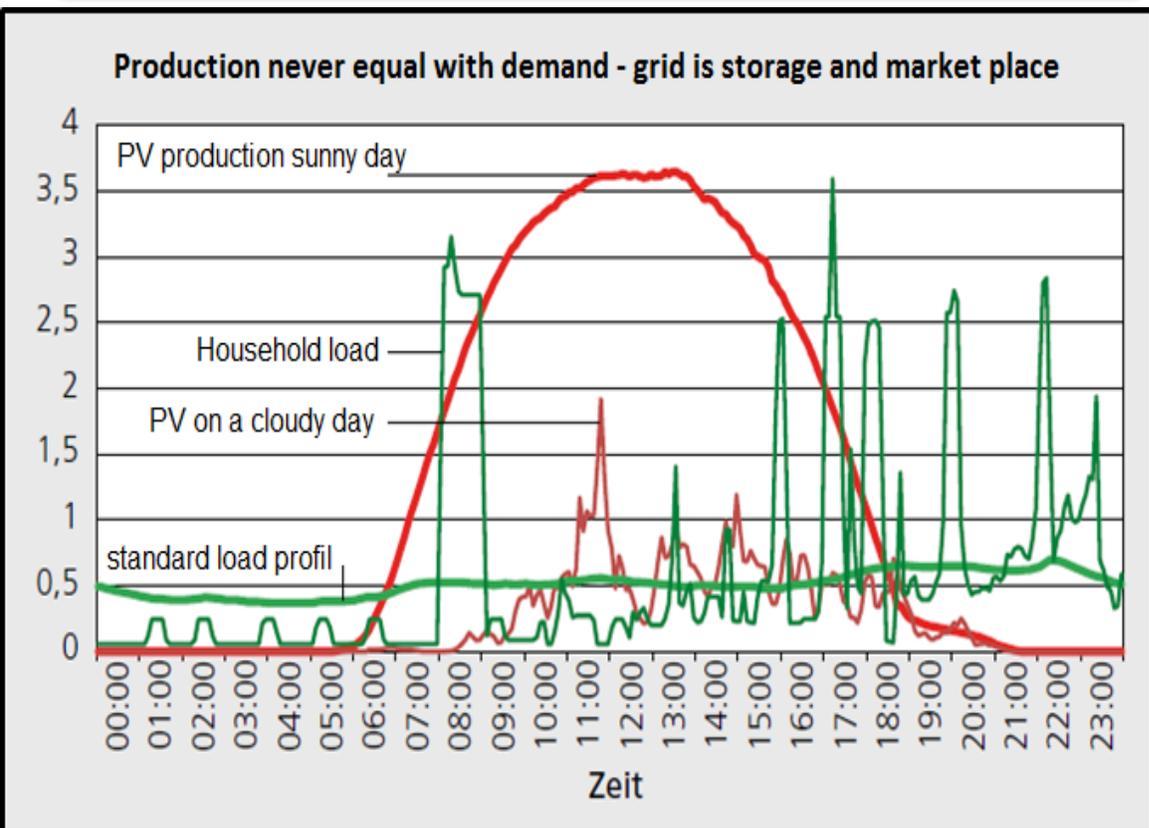
Tarifstruktur Strompreise Schweiz



- Eigenverbrauch bietet Schutz gegen Marktwertisiko, wenn Marktpreise bei starker Sonne auf null sinken.
- Eingespart werden können
 - Variabler Teil der Netzgebühr
 - Energiepreis
 - Abgaben (zB. MWSt)
 - Netzzuschlag
- Einspeisung zum Grosshandelspreis ist viel weniger interessant

Stromerzeugung von dezentralen Kleinanlagen ist meist nicht deckungsgleich mit dem Verbrauch. Solarstrom kann man verkaufen (einspeisen), selber verbrauchen oder speichern

Lastgang individuell und kollektiv



Eigenverbrauch mit grosser Flexibilität

- **Eigenverbrauch:** selbst erzeugter Strom wird vor Ort verbraucht.
- **Der Eigenverbrauch kann durch Steuerung von Geräten und durch Speichern maximiert werden.**
- **E-Mobile und Wärmepumpen (inkl. Batterien und Wärme-Pufferspeicher) erhöhen die Rentabilität.**
- **Nutzung im Arealverbund steigert Auslastung der Solaranlage (ZEV, Energiegemeinschaften).**

Durchbruch der Speichersysteme (Beispiel D, Kalifornien): Netzoptimierte Bewirtschaftung für Netzstabilität entscheidend

Batterieprieße sinken laufend und es kommen neue Materialien. Für Kostenparität und Sicherheit von E-Mobilen ist dies entscheidend.

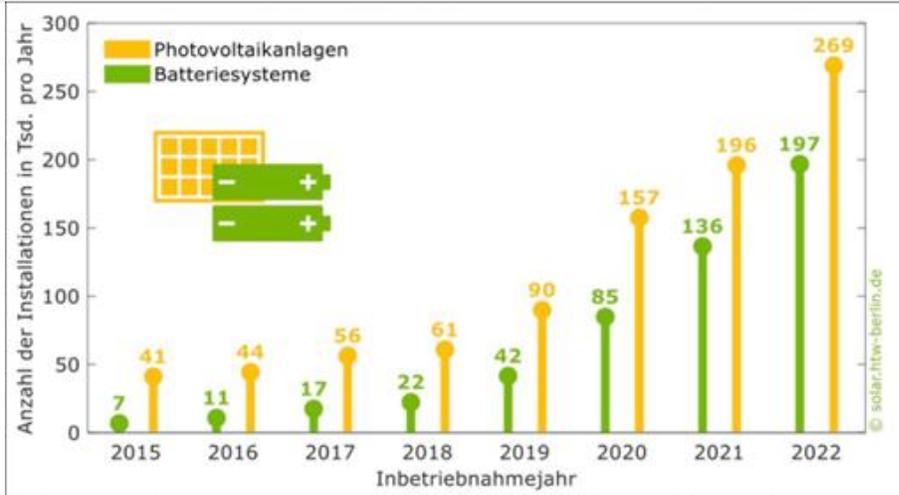
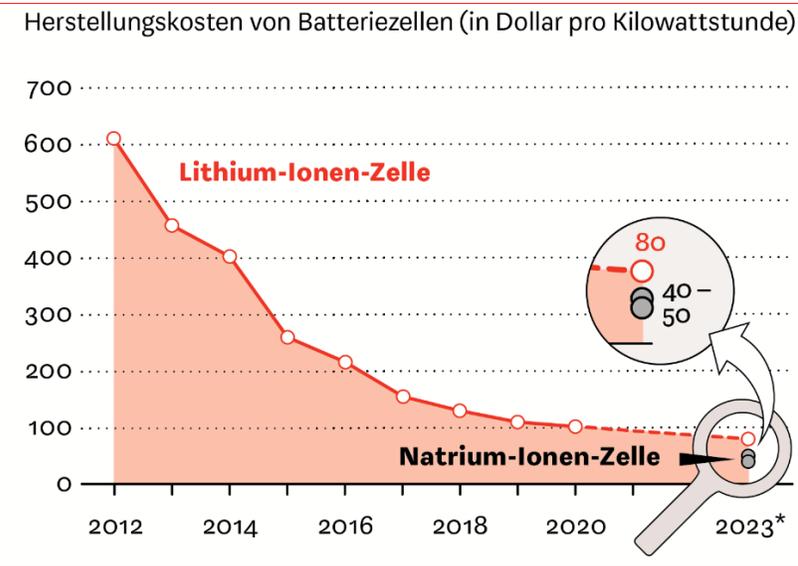


Bild 6 Anzahl der in deutschen Privathaushalten jährlich installierten PV-Anlagen und Speichersysteme (Angabe in Tausend, Daten: Marktstammdatenregister).

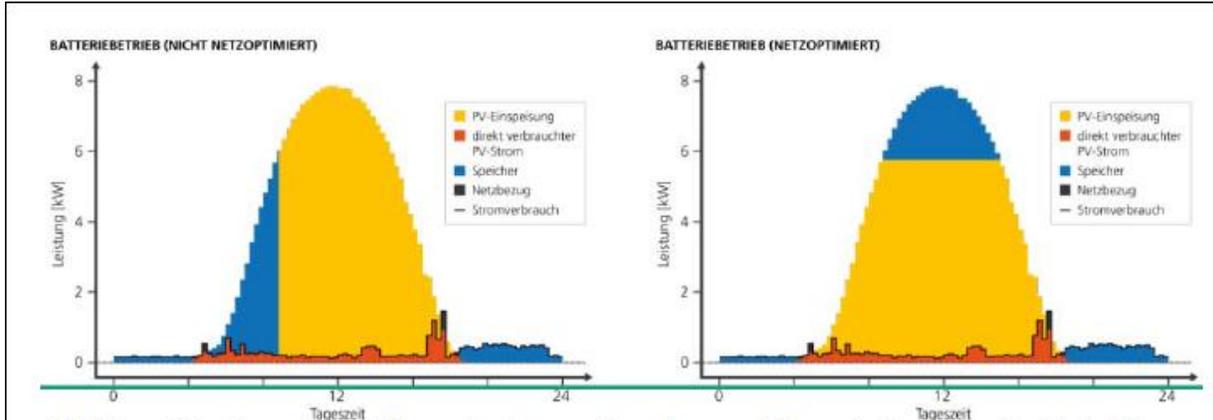
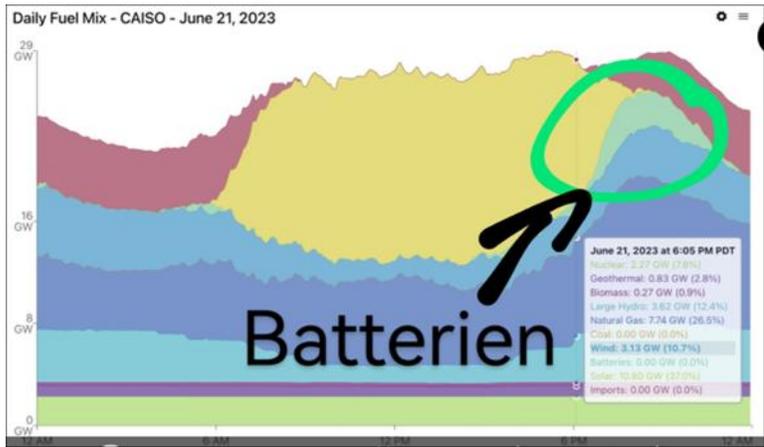


Abbildung 55: Gegenüberstellung der konventionellen und der netzdienlichen Betriebsführung [ISE7].

Batterien zur Integration fluktuierender Erzeugung: «Game changer» der letzten 10 Jahre, Anwendung in allen Grössen

Powin, BlackRock start working on world's largest battery

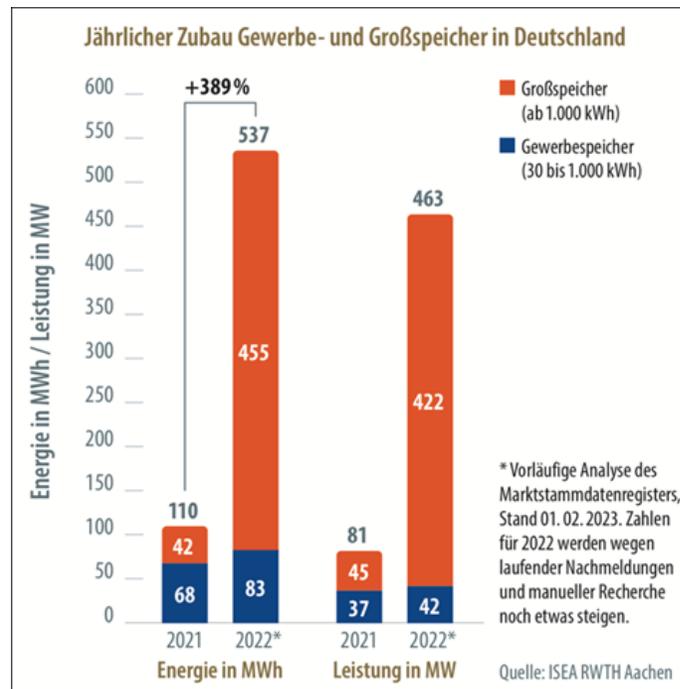
By Beatriz Santos on Nov 21 2022, 1:00pm



US battery specialist Powin and US investment firm BlackRock have started work on a 909 MW/1,915 MWh battery energy storage system (BESS) in Australia. Construction is set to begin in 2023 and will finish by mid-2025.

<https://www.pv-magazine.com/2022/11/21/powin-blackrock-start-working-on-worlds-largest-battery>

Der Batterien Boom findet weltweit statt. Dank gesunkenen Kosten eröffnen sich ständig neue Anwendungen.



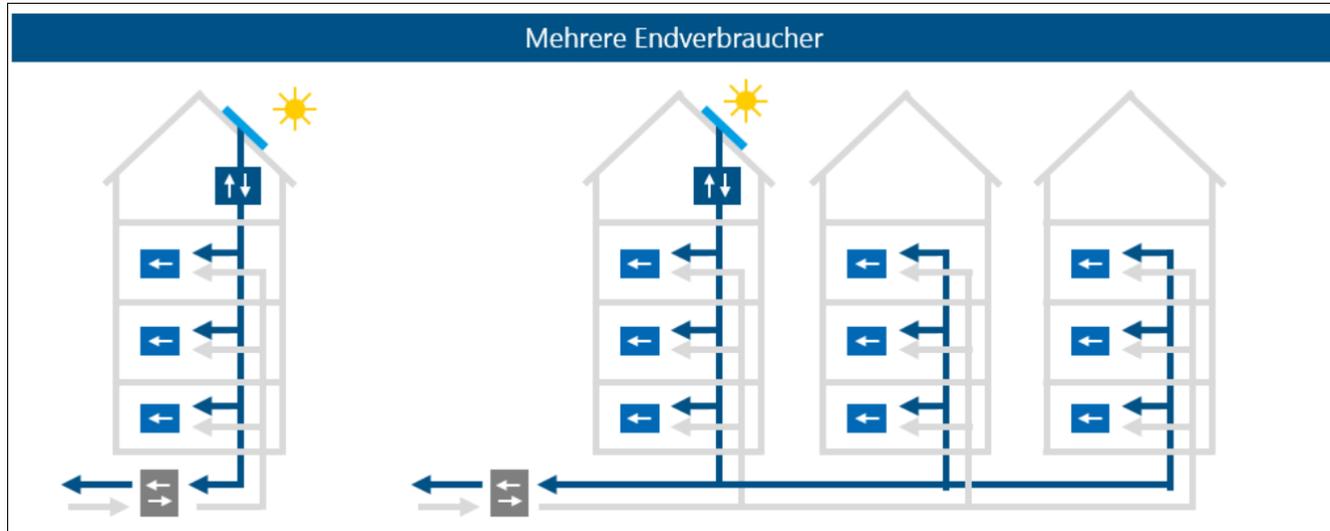
China Launches First 700 TEU Electric Containership for Yangtze Service



700 TEU containership is powered by containerized batteries that will be swapped out along the route (COSCO)

Alternative zu Batterien:

Dezentrale Areallösungen mit grösseren Eigenversorgungsmöglichkeiten



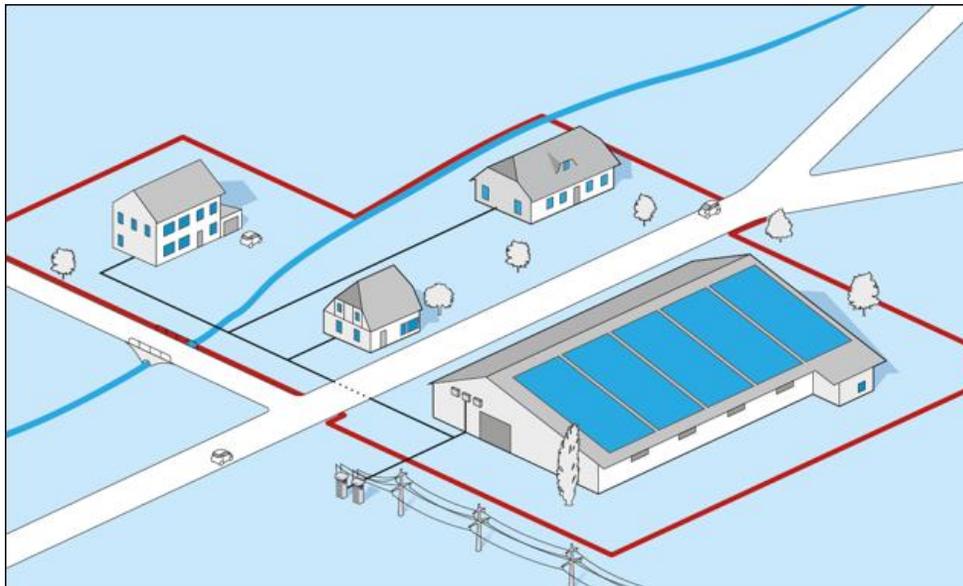
Mehrere Parzellen bilden ein Arealnetz
mit PV-Eigenproduktion
sogenannte ZEV (Zusammenschluss
zum Eigenverbrauch)
Keine öffentlichen Netze im Spiel

Seit 2018 möglich: Stromverkauf über Parzellen hinweg ohne
Entrichten einer Netzgebühr

Ab 2025 soll es Eigenverbrauchsgemeinschaften geben, die das
öffentliche Netz (nur Netzebene 7) mit bis zu 60% Rabatt auf der
Netzgebühr nutzen dürfen.

ZEV Zusammenschluss zum Eigenverbrauch

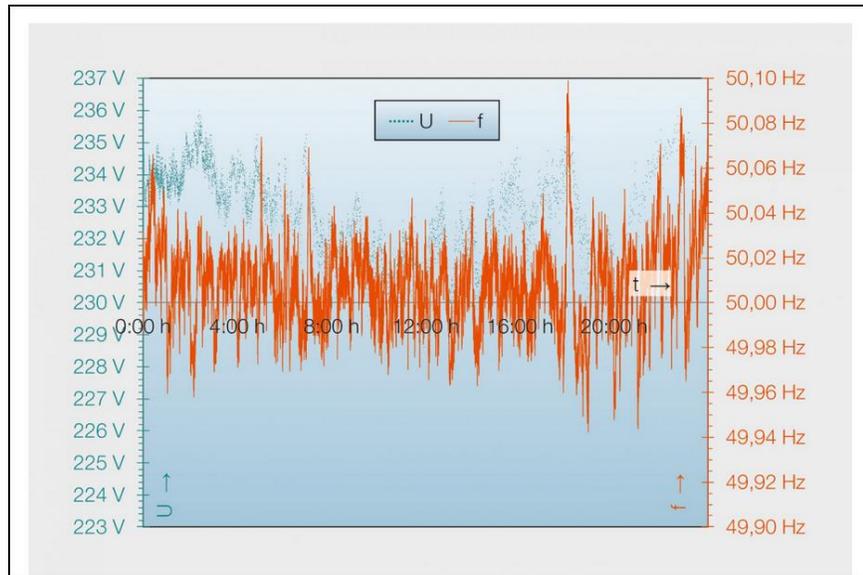
- Erhöhter Eigenverbrauch steigert Rentabilität
- Ein einziger Stromanschluss
- Aufstieg zum Grossverbraucher mit Marktzugang ab 100 MWh/a



Übersicht

- Repetitorium der letzten Vorlesung
- Betrachtungen zur Photovoltaik (Restanz von Teil 2)
- **Was heisst Versorgungssicherheit im Stromsektor?**
- Was leistet der Strommarkt?
- Versorgungssicherheit und Systemintegration

Versorgungssicherheit misst sich an einer garantierten Spannungshaltung im Stromnetz



Hinter dem operativen Ziel Versorgungssicherheit verbirgt sich eine komplizierte Infrastruktur & Organisation:

- **Ausreichende Leistung**
- **Ausreichend viel Energie**
- **Ausreichende Netze**

sollen jederzeit verfügbar sein.

Schon sehr kleine Abweichungen führen zum Blackout (Spannungsriss) oder zum Brownout (Unterbruch im Netz).

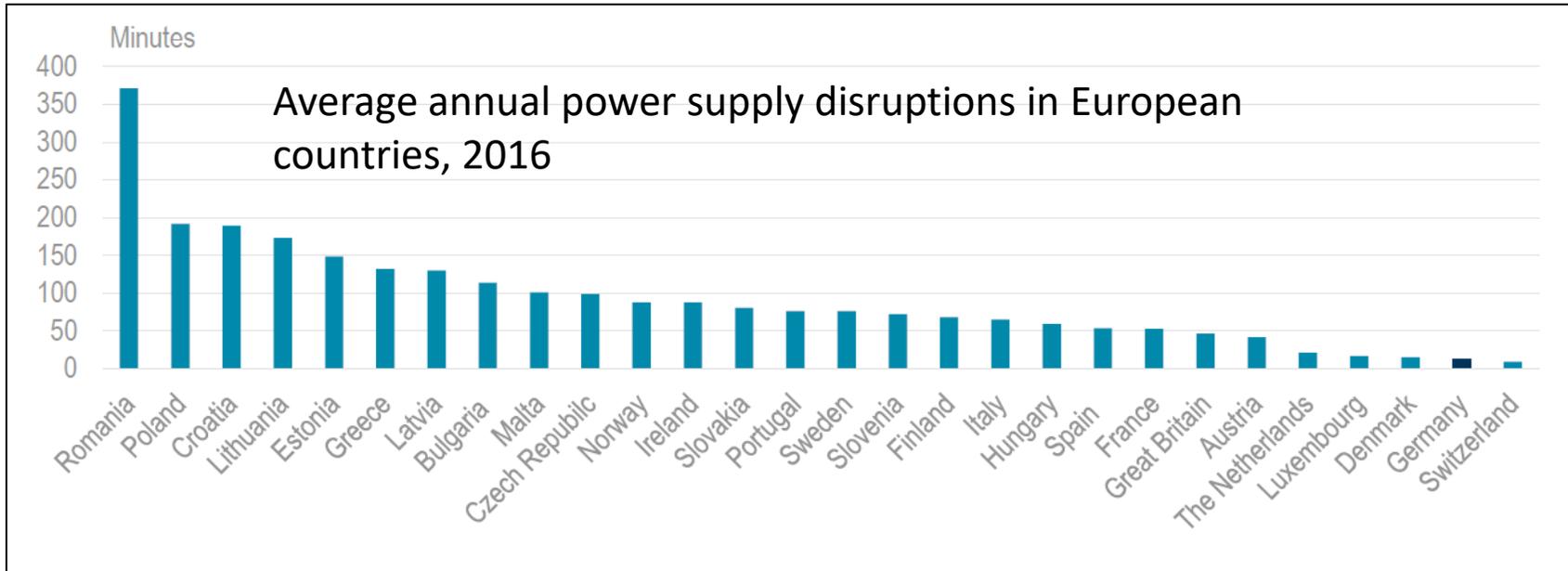
Stromausfälle sind prohibitiv teuer. Die Vermeidung von Ausfällen ist Priorität 1 in jedem Stromsystem.

Versorgungssicherheit steht nicht allein – Optimierung ist gefragt



Magisches Dreieck
der Energiewirtschaft

Messwert für Versorgungssicherheit: SAIDI



Quelle: IEA
Country
Report
Germany,
2020

SAIDI

System Average Interruption Duration Index (SAIDI) = durchschnittliche unfreiwillige Stromausfalldauer pro Netzanschluss.

Hohe Marktanteile von Erneuerbaren wie in CH, D, DK führen nachweislich nicht zum Absinken der Versorgungssicherheit, weil der Stromsektor daran gewöhnt ist, mit Fluktuationen umzugehen.

Nicht nur die Produktionskosten, sondern auch die Netzkosten mitdenken!

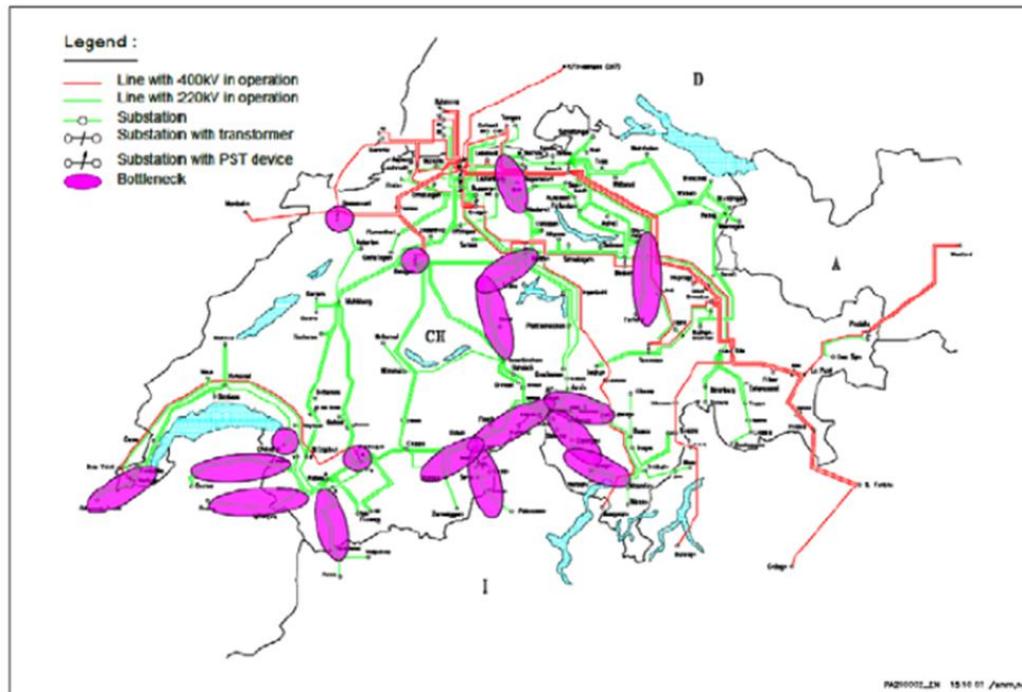
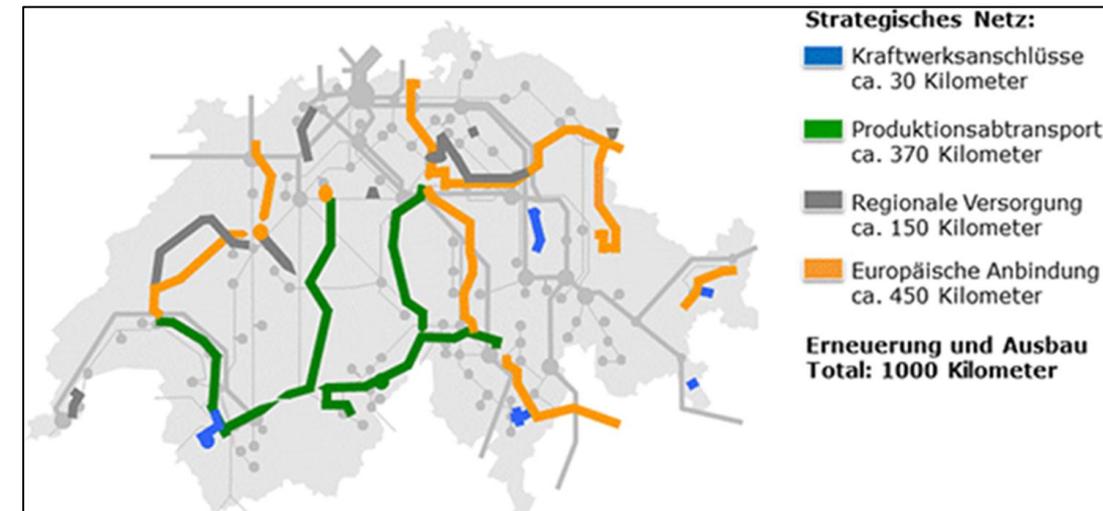


Abbildung 3: Engpässe (in Legende auf engl. Bottleneck) im Schweizer Hochspannungs-Übertragungsnetz (Quelle: Bericht des Bundesrates zur Zukunft der nationalen Infrastrukturnetze in der Schweiz, September 2010).

Schweiz hat Netzstrategie mit grossen Lücken verabschiedet.

Bei der Planung vergessen blieben:

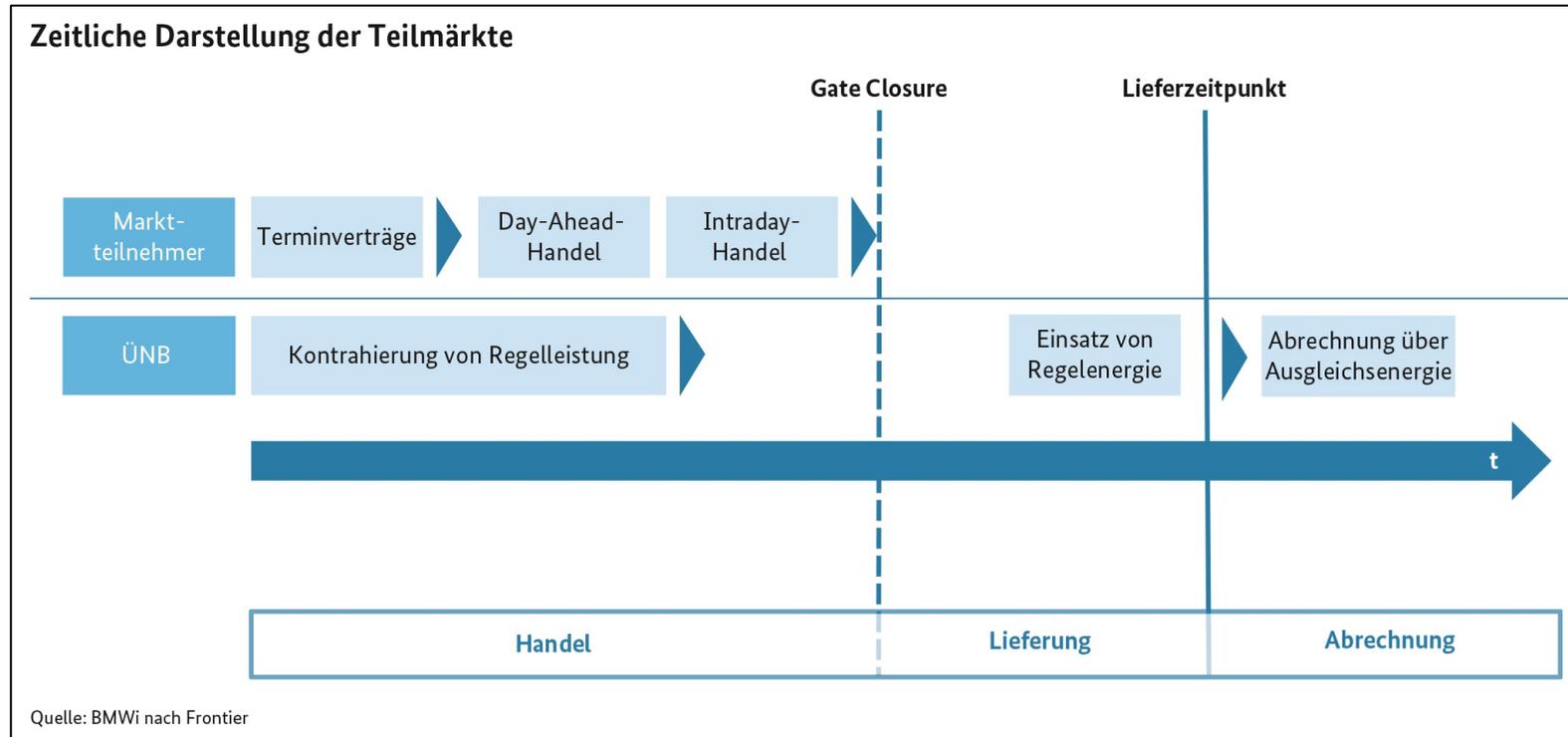
- Aufbau von alpinen Solaranlagen
- Beschleunigter Solarausbau im Mittelland
- Batterien als alternative Option



Übersicht

- Repetitorium der letzten Vorlesung
- Betrachtungen zur Photovoltaik (Restanz von Teil 2)
- Was heisst Versorgungssicherheit im Stromsektor?
- Was leistet der Strommarkt zur Integration von fluktuierender Energie?
- Versorgungssicherheit und Systemintegration

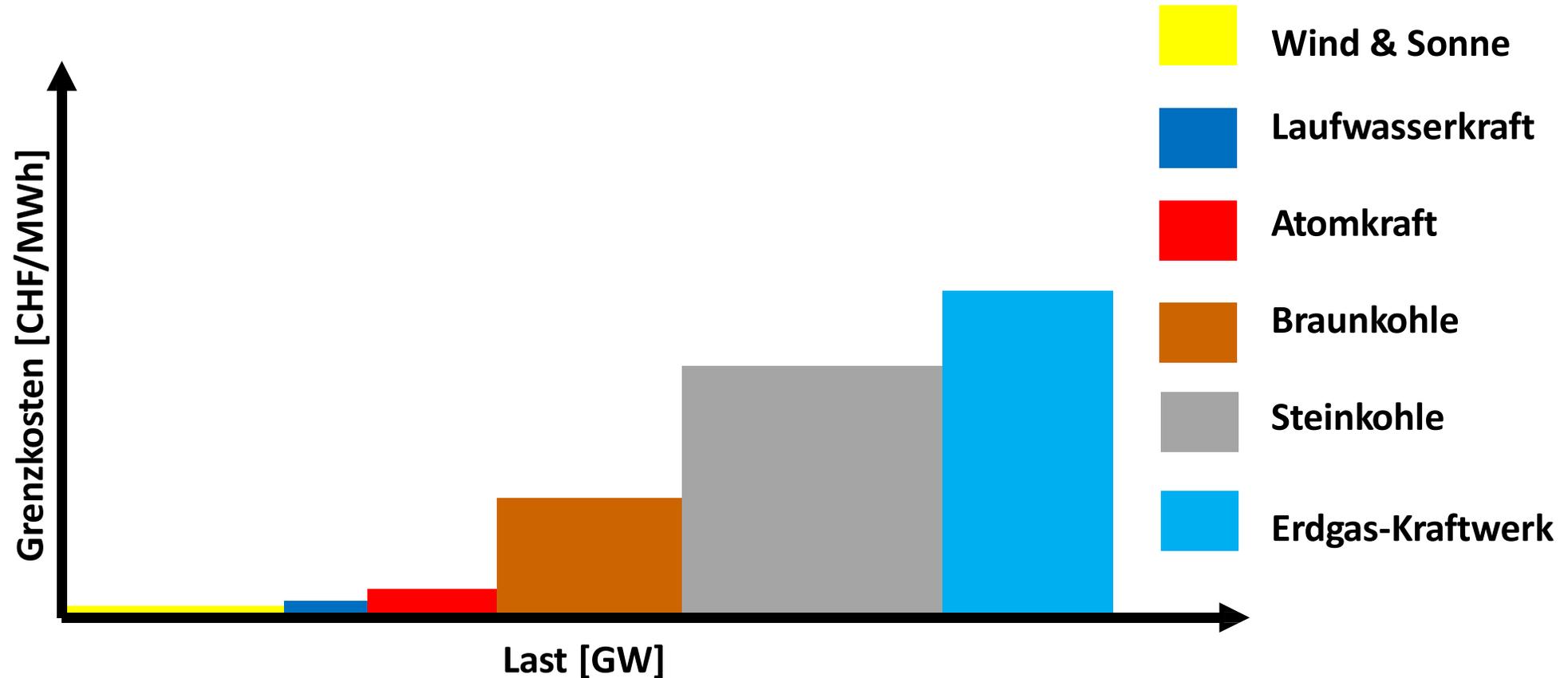
Die Netzgesellschaft (Swissgrid) organisiert den Stromhandel und schafft Plattformen



- Kauf-Verträge werden zwischen privaten Anbietern und Händlern (inkl. Verteilnetzbetreibern) abgeschlossen.
- Wie bei Hypotheken gibt es kurz-, mittel und langfristige Verträge.
- Der TSO überwacht die Spannungshaltung und greift mit Regelernergie ein, wenn Stromüberschüsse oder Stromdefizite bestehen.

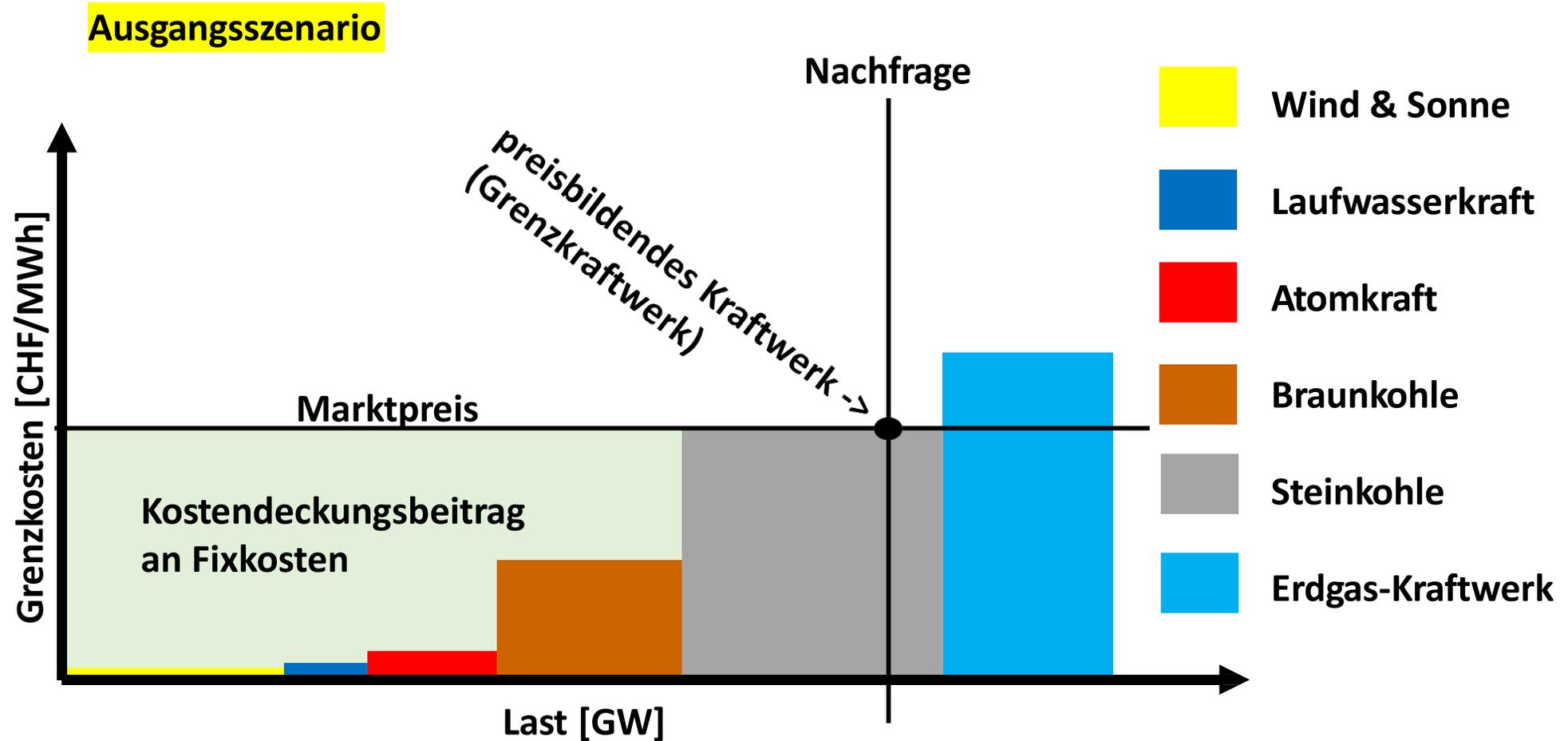
Wer darf zu welchem Preis liefern? Das bestimmt die „Merit Order“ (deutsch: Einsatzreihenfolge) ?

Preisbildung jede Stunde an der Strombörse



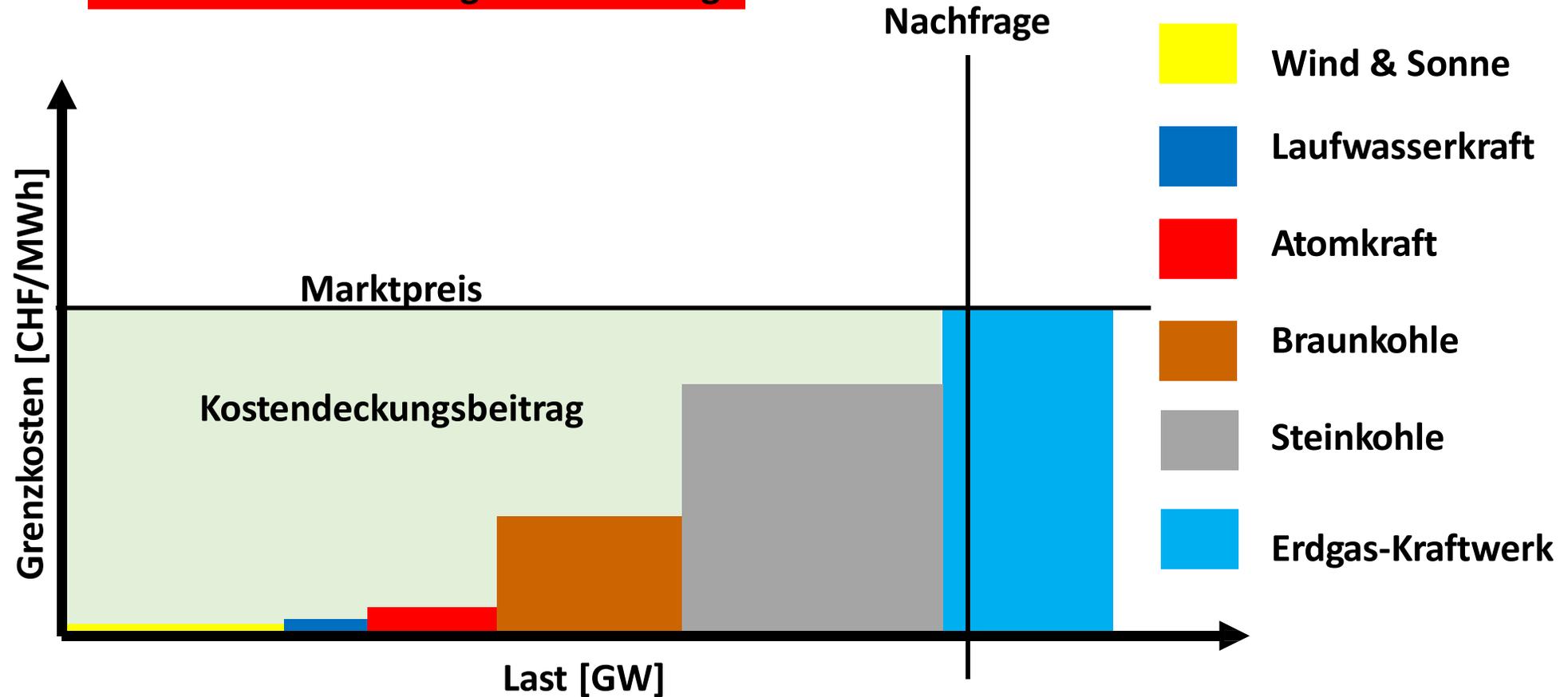
Auf dem Strommarkt zählen nur die variablen Kosten. Die Investitionen gelten als «versunkene Kosten» (sunk cost). Sind die variablen Kosten gedeckt, wird ein Kraftwerk in betrieb genommen. Wind, Wasser, Sonne und Atomkraft haben keine variablen Kosten. Erdgas-Kraftwerk hat die höchsten variablen Kosten.

Marktpreis entsteht durch Deckung der Nachfrage
Preis wird vom teuersten Kraftwerk bestimmt, das nötig ist.



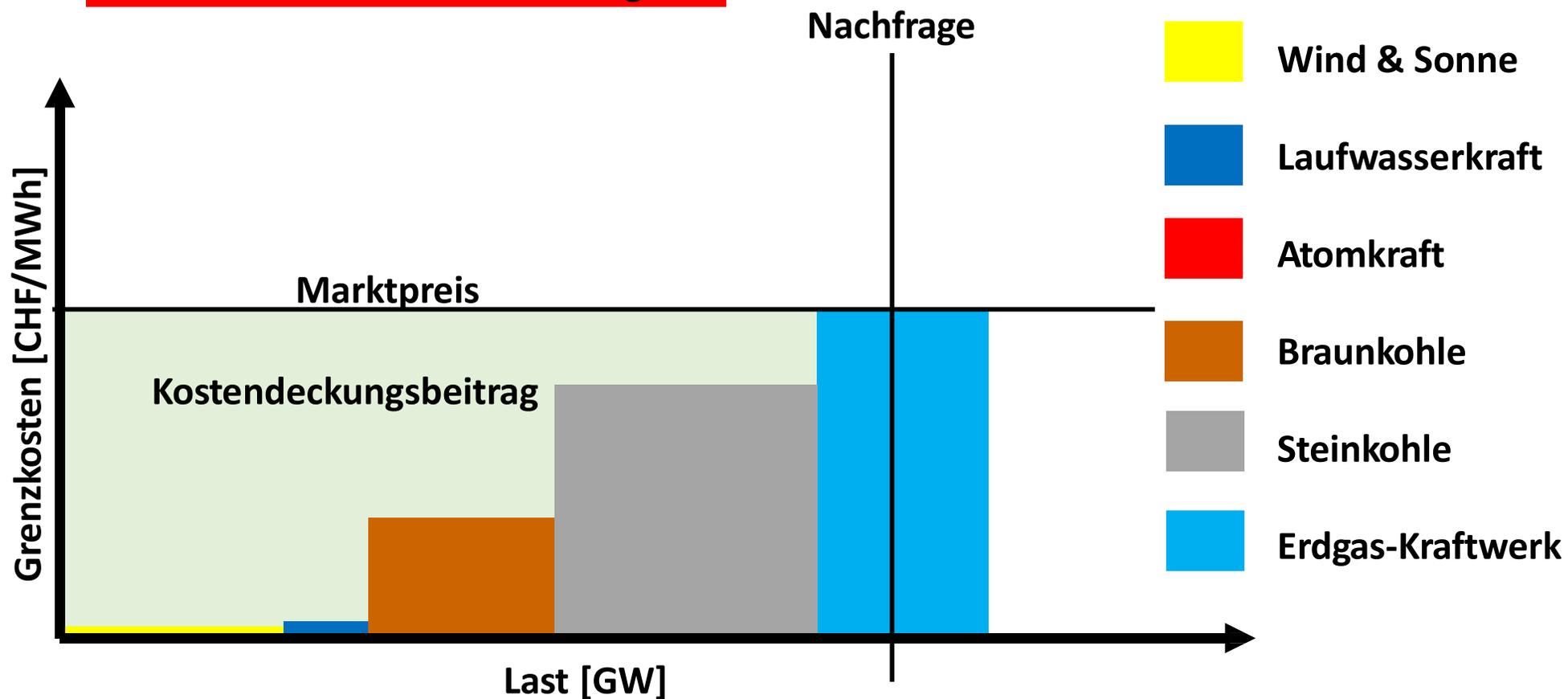
Steigt die Nachfrage, steigt der Erlös für alle Kraftwerke, abhängig von den variablen Kosten des teuersten Anbieters

Marktreaktion auf steigende Nachfrage



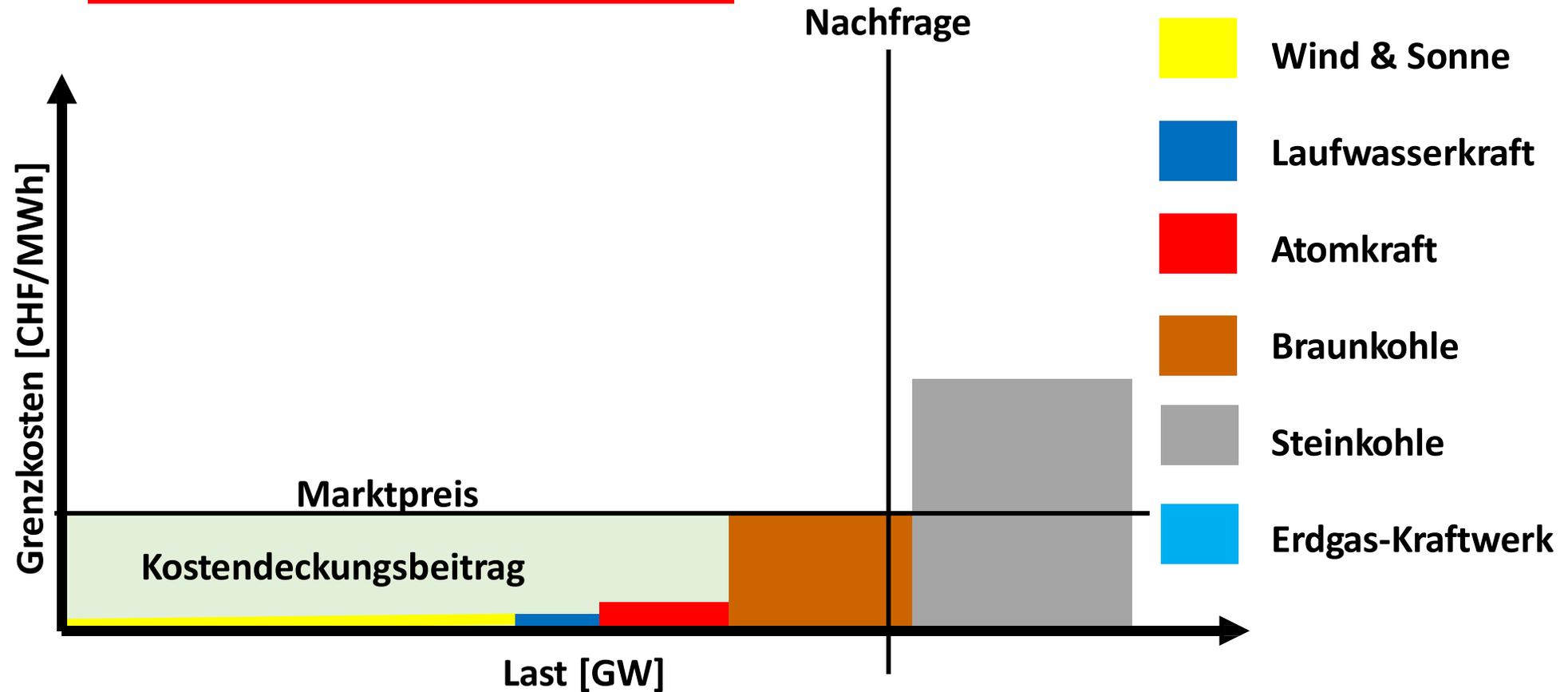
Geht die Sonne unter, verschwindet das billigste Stromangebot, der Preis steigt, weil teurere Kraftwerke zum Einsatz kommen

Marktreaktion auf sinkendes Angebot

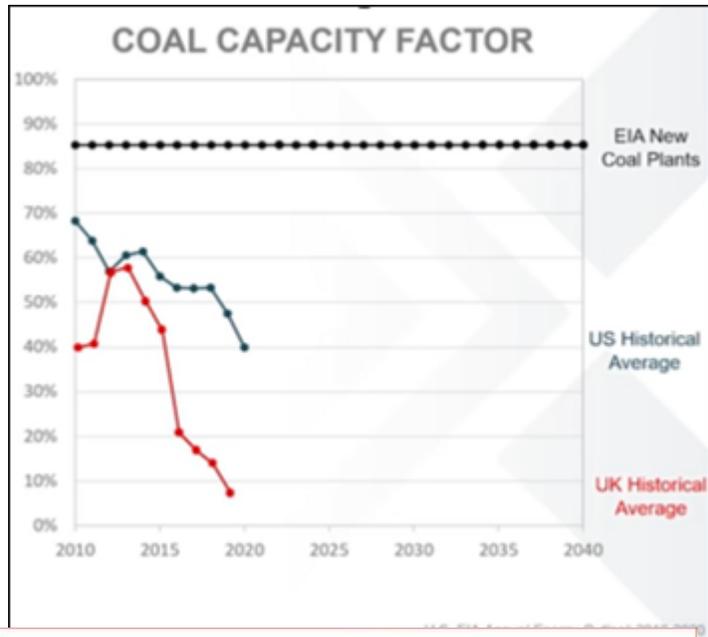


Steigt die Produktion dank Wind oder Sonne, werden die teuersten Kraftwerke abgeschaltet. Der Preis sinkt!

Marktreaktion auf steigendes Angebot



Key take-aways: Bedeutung des Strommarkts für EE-Integration



- Die Aussicht auf Rendite ist grösste Triebfeder der Energiewende.
- Preissignale an Erzeuger und an Verbraucher bestimmen das Verhalten
 - Entstehen eines Sekundärmarkts für Stromüberschüsse (Wärme, Speicher usw.)
 - Abregelung von konventionellen Energien bei tiefen Preisen
- Photovoltaik und Windkraft
 - «must-run-Technologien», Abregelung spart kein Geld
 - Wirtschaftlich überlegen, weil
 - Gesamtkosten am tiefsten
 - variable Kosten nahe bei Null
- Folge: Atom- und Kohlestrom werden aus dem Markt verdrängt, weil teurer als Sonne und Wind (Brennstoffkosten, Emissionsabgaben usw.)
- Es kommt zum «crowding out»: Solarstromanlagen und Windanlagen liefern auch bei tiefen Preisen noch einen Deckungsbeitrag
- Atom & Kohle können Kosten nicht decken, geraten in Abwärtsspirale

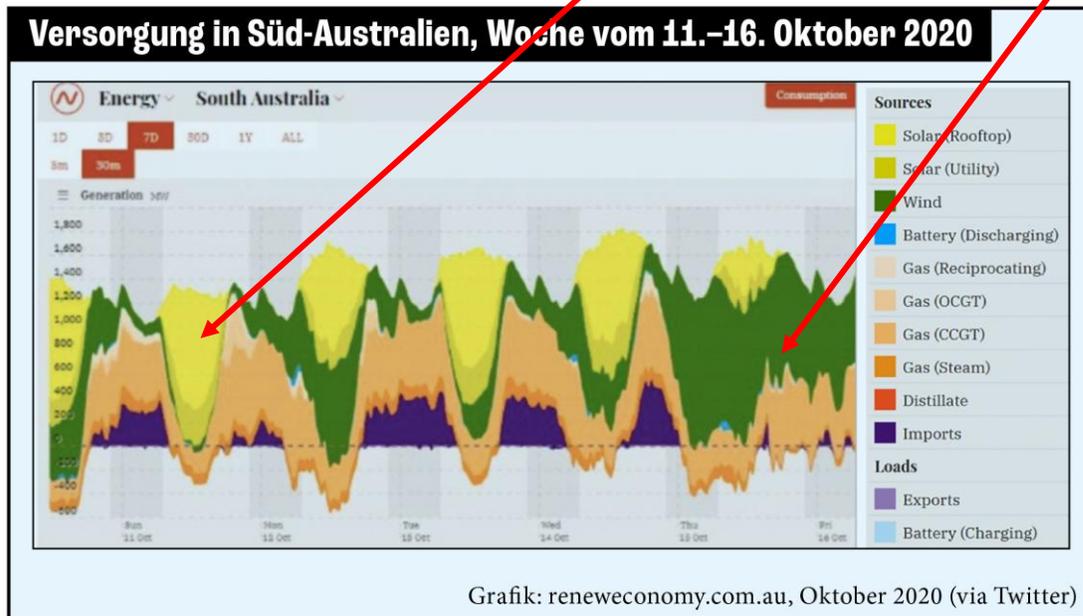
Übersicht

- Repetitorium der letzten Vorlesung
- Betrachtungen zur Photovoltaik (Restanz von Teil 2)
- Was heisst Versorgungssicherheit im Stromsektor?
- Was leistet der Strommarkt?
- **Versorgungssicherheit und Systemintegration**
 - **Was geschieht, wenn die Sonne nicht scheint, der Wind nicht bläst?**
 - **Oder wenn es u viel Sonne und Wind gibt?**

Herausforderung I

Spannungshaltung bei fluktuierender Stromerzeugung

Beispiel Süd-Australien
Hoher Anteil an fluktuierender Produktion
phasenweise 100% aus Sonne oder aus Wind innert 1 Woche



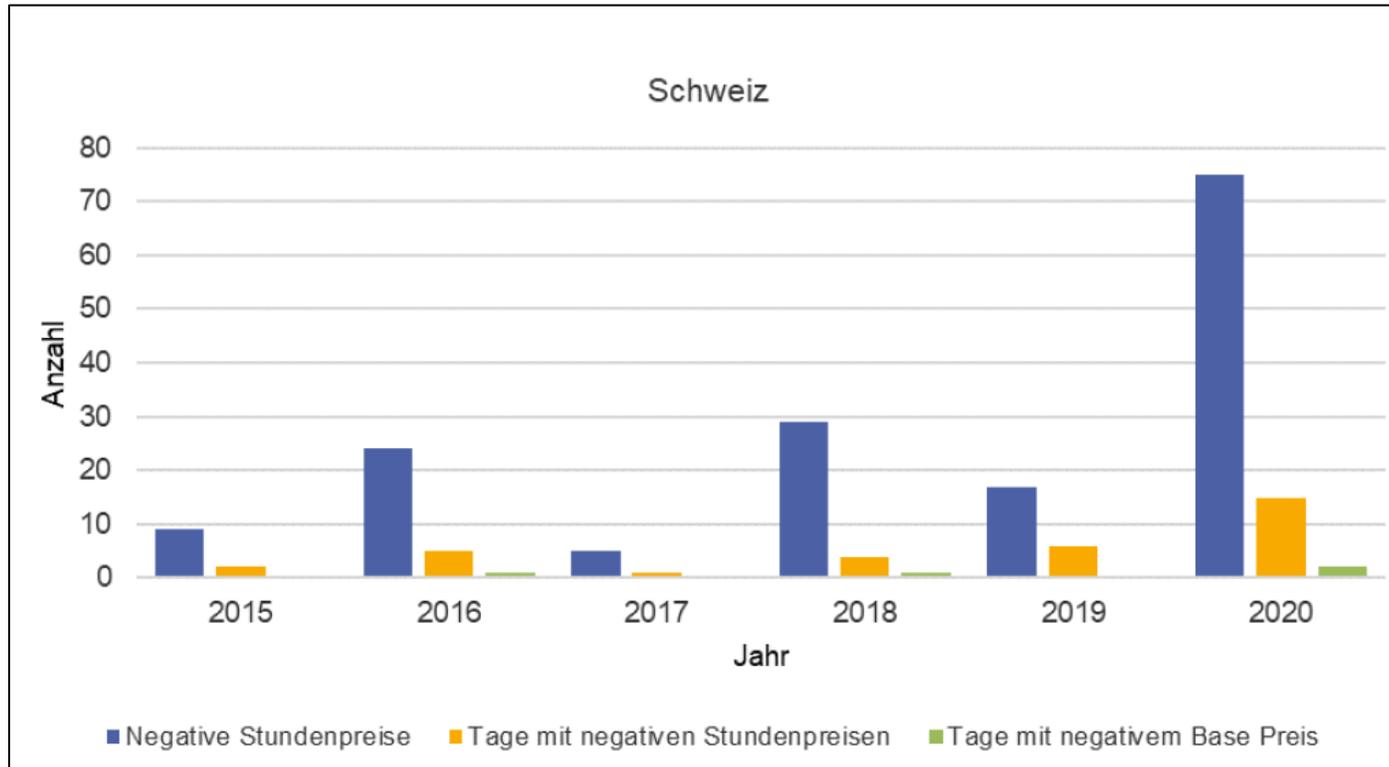
**Starkes „Ramping“
= Hoher Flexibilitätsbedarf**

**Batterien und andere
Speicher müssen das Netz
stabilisieren**

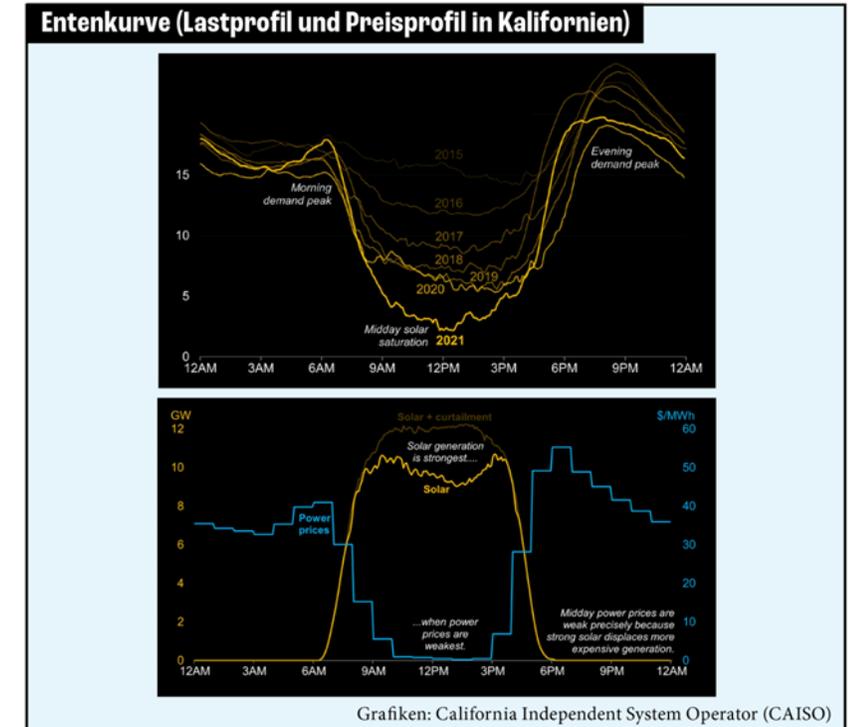
Im Bundesstaat Süd-Australien liefern Wind- und Solarstrom über 60 Prozent des durchschnittlichen Jahresverbrauchs; das Bild zeigt, wie innerhalb einer Oktoberwoche zwei unterschiedliche Stromquellen den Verbrauch vollständig deckten: am Sonntag 11. Oktober 2020 mit 100% Solarstrom, am Donnerstag 15. Oktober mit 100% Windstrom. Die Pufferung erfolgt mittels Erdgas, Import/Export und Batterien.

Herausforderung II

Sinkender Marktwert und Zunahme von Stunden mit negativen Preisen



ElCom: Analyse der negativen Preise für die Schweiz, Frankreich und Deutschland zwischen 1. Januar 2015 und 31. Dezember 2020, Januar 2021



Die«Entenkurve» (oben). Solarstromanlagen auf den Hausdächern senken die Nachfrage im Netz. Am Mittag sinkt die Last Jahr für Jahr stärker gegen null. Preiskurve (unten): Die Preise sinken bei Sonnenschein während Stunden auf null. Die Netzbetreiber bauen Batterien, um die Produktion tagsüber einzuspeichern und am Abend auszuliefern. Der Anteil der Photovoltaik in Kalifornien hat sich seit 2011 im Jahresdurchschnitt auf 26 Prozent verfünffzehnfacht (2021).

Herausforderung III: Versorgungssicherheit im Winter



"Wir haben im Winterhalbjahr ein Problem«

«Die Stauseen sind zu klein, um die Lücke den ganzen Winter über abzudecken. Wir haben einfach zu wenige Elektronen im Winter.» (Jens Alder, Präsident Alpiq, Zitat aus NZZ)

Schliessung von AKWs erhöht insb. Winterbedarf!

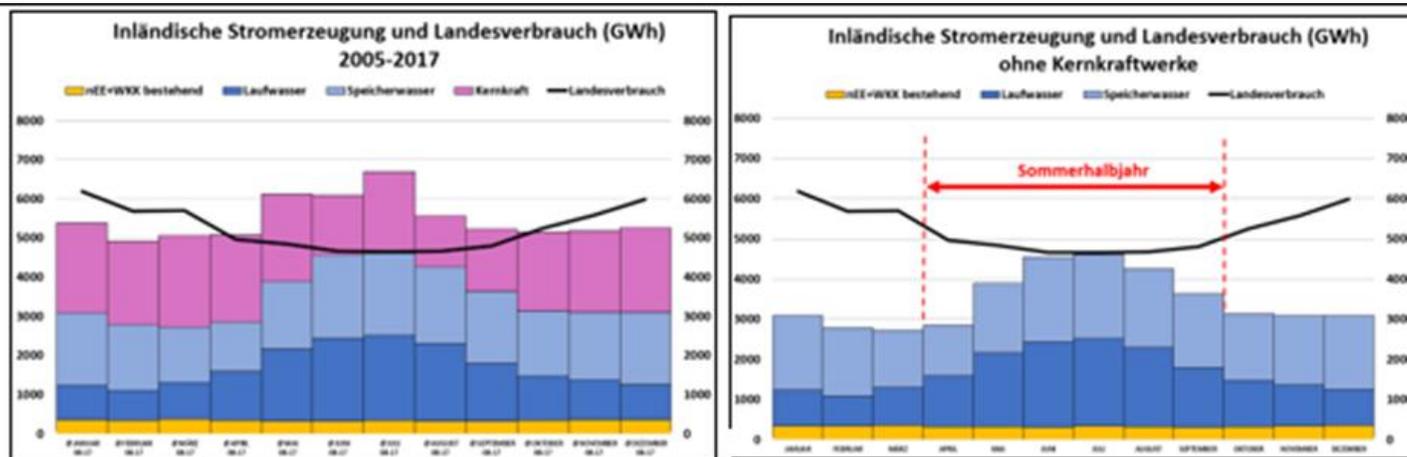
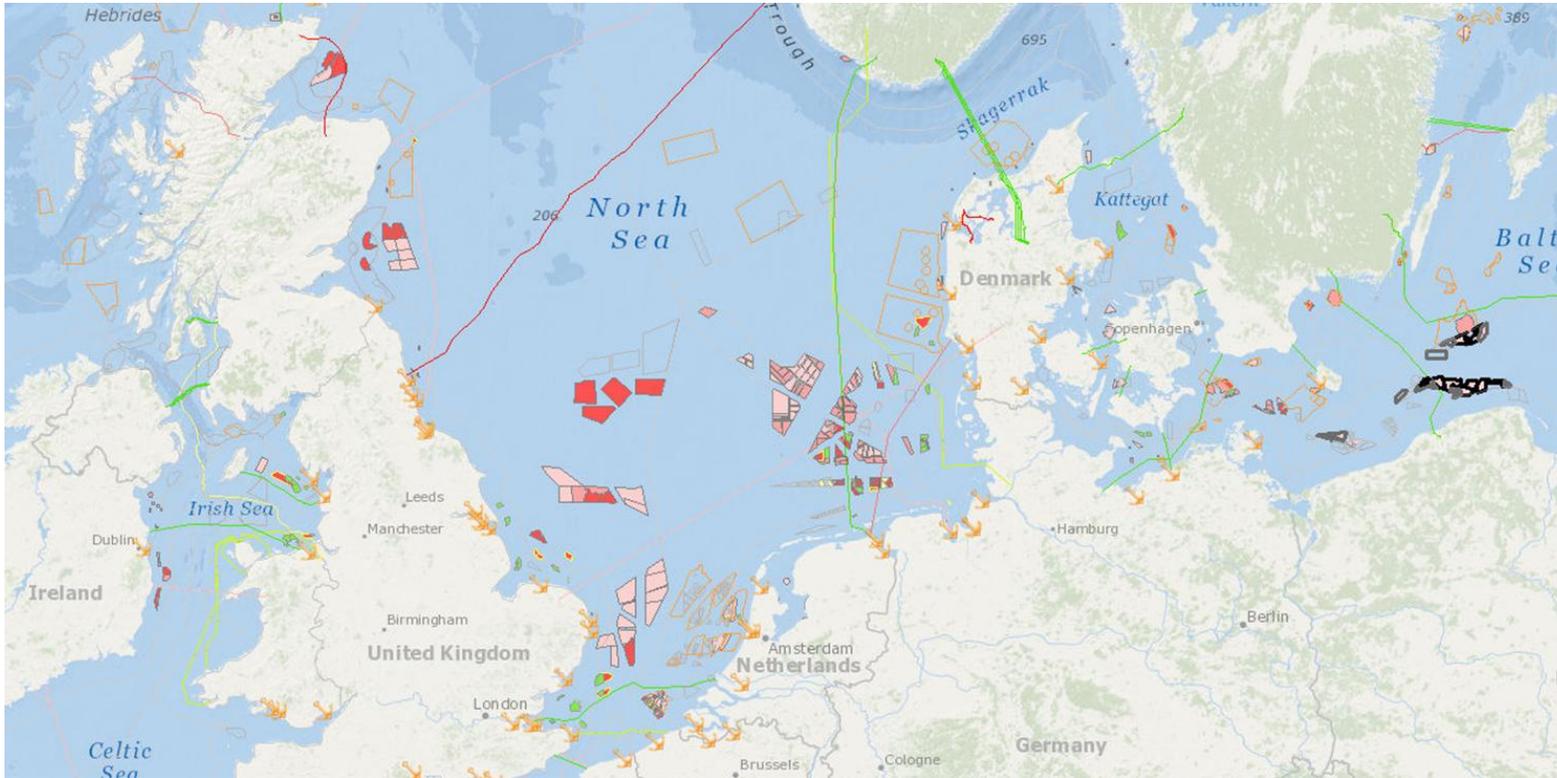


Abbildung 29 Inländische Stromproduktion bisher (Ø 2008-17) und ohne Kernenergie (rechts),
(Daten: Elektrizitätsstatistik, eigene Darstellung)

Acht Strategien für Versorgungssicherheit & Integration von fluktuierenden erneuerbaren Energien

1. **Vernetzung mit Ausgleichseffekten**
2. Strategische Überproduktion (ggf. mit Abregelung)
3. Diversifikation der Herkunft & der Ressourcen
4. Speicher (Energie- und Leistungs-Reserven)
5. «Smart grids» mit Leistungs- und Lastmanagement
6. Tarifmodelle für Energiespeicher Lastabwurf
7. In Notfällen I: strategische Reserven (Speicherung und Vorratshaltung ausserhalb des Marktes)
8. In Notfällen II: Rückgriff auf fossile Reserven

Beispiel Nordsee, Deutschland: unterwegs Richtung «europäische Kupferplatte»



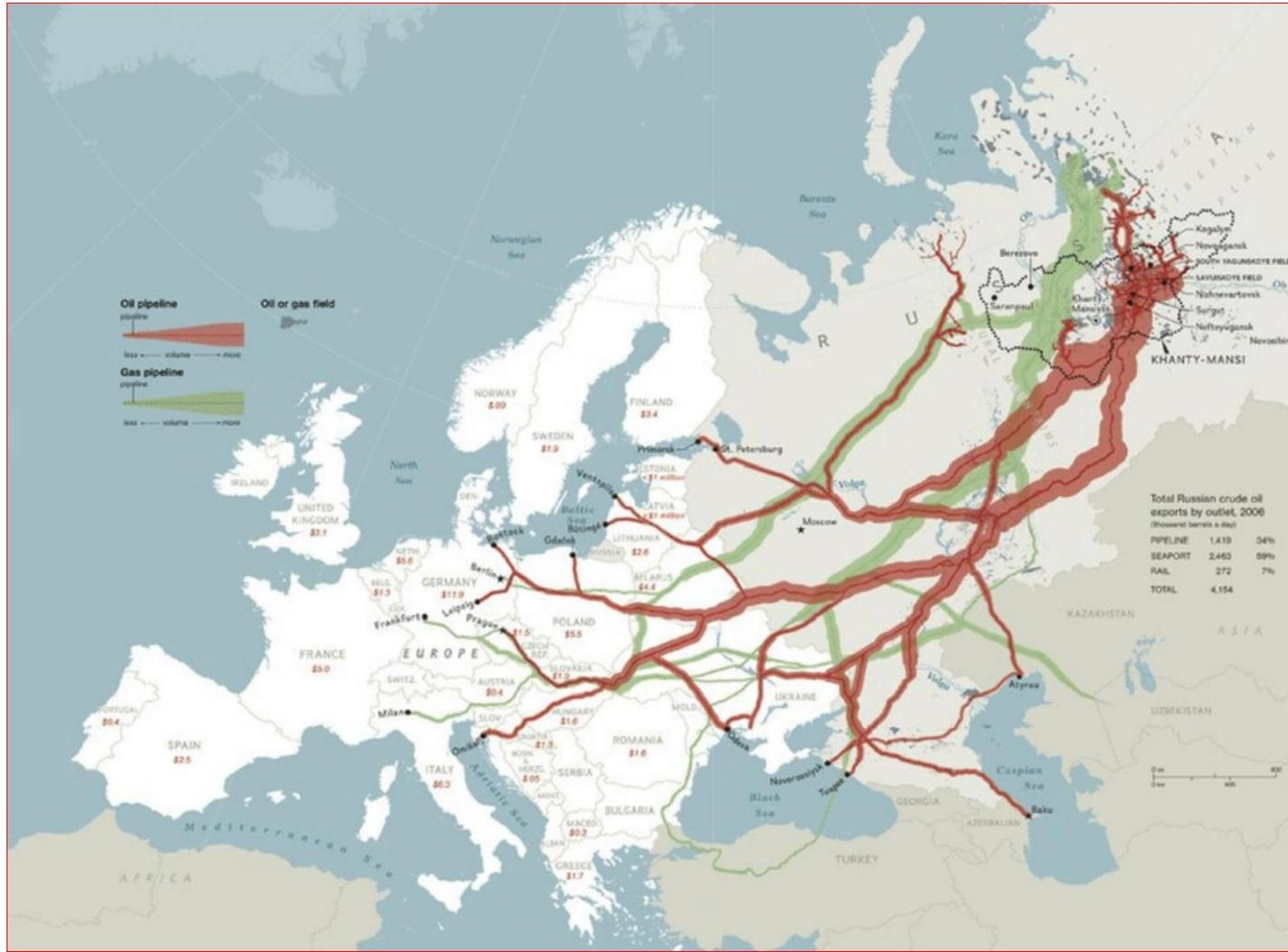
total net transfer capacity requirements T/W (existing + additional)	Interconnection	Capacity additional + (existing), GW
	UK&Ireland-France	8 + (2)
	UK&Ireland Nordel	0 + (0)
	UK&Ireland-Benelux & Germany	3 + (0)
	France-Iberia	32 + (1)
	France-Benelux & Germany	14 + (6)
	France-Central Europe	7 + (3)
	France-Italy & Malta	0 + (3)
	Nordel-Benelux & Germany	0 + (3)
	Nordel-Poland & Baltic	4 + (1)
	Benelux & Germany-Central-EU	0 + (1)
	Benelux & Germany-Poland & Baltic	9 + (1)
	Central-Europe-Poland & Baltic	0 + (2)
	Central-South East EU	1 + (2)
	Central-Europe-Italy	0 + (5)
	South East EU-Italy	9 + (1)
	Total	87 + (34)

Vorteile der Vernetzung:

- Balancing power over several markets
- Access to new resources
- Access to existing and new storage (e.g. pump storage)
- Access to excess power in other areas



Zum Vergleich: Perimeter der fossilen Transport- Infrastruktur sind länger und viel riskanter

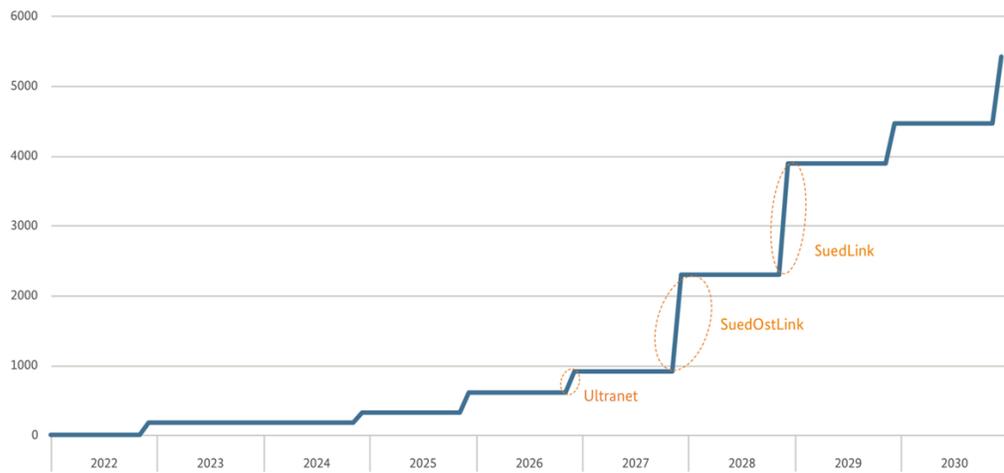


Die Leistung neuer HGÜ-Leitungen wächst

HGÜ: Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitung

Geplante Inbetriebnahmen

Kumulierte Gesamtwerte - monatlich betrachtet in km



Quelle: Geplante Inbetriebnahmen gemäß Eröffnungsbilanz 2022

24.08.2023

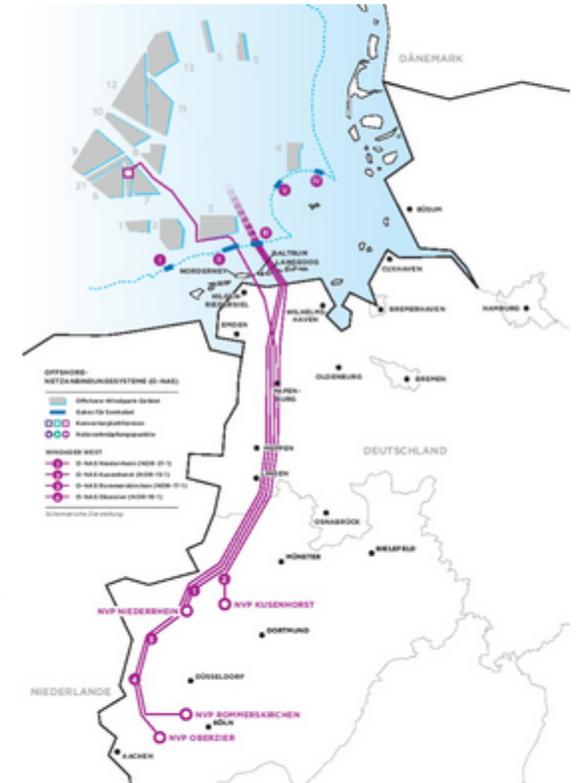
WINDADER WEST: AMPRION BRINGT 8 GIGAWATT OFFSHORE-WINDENERGIE NACH NRW

Die Amprion Offshore GmbH steigt in die Planungen des Energiekorridors Windader West ein. Bis zu acht Gigawatt Leistung aus Offshore-Windenergie soll die Stromverbindung direkt nach Nordrhein-Westfalen bringen und damit in Summe den Energiebedarf von acht Millionen Menschen decken.

Damit Deutschland seine Klimaziele erreicht, sollen Windparks auf See im Jahr 2035 so viel Leistung bereitstellen wie etwa 50 große Kohlekraftwerke. Besonders in den Lastzentren im Westen Deutschlands soll Offshore-Windenergie konventionelle Energieträger ersetzen. Dafür braucht es nicht nur neue Offshore-Windparks, sondern auch neue Leitungen, die sie mit dem Übertragungsnetz an Land verbinden – sogenannte Offshore-Netzanbindungssysteme. Das ist die Aufgabe der [Windader West](#).

Sie umfasst die vier Offshore-Netzanbindungssysteme NOR-15-1, 17-1, 19-1 und 21-1. Die Seekabel beginnen in den Windparks in der Nordsee und führen gebündelt als Erdkabel von der Küste bis zu ihren Netzverknüpfungspunkten in der Metropolregion Rhein-Ruhr. 2032 sollen die ersten zwei Gigawatt Offshore-Leistung über eine Leitung der Windader West nach Nordrhein-Westfalen fließen. Die restlichen drei Leitungen sollen in den Jahren 2033, 2034 und 2036 in Betrieb gehen.

„Die Windader West bündelt vier Vorhaben mit einer Übertragungsleistung von jeweils 2.000 Megawatt. Die Systeme gehören zu der neuen leistungsfähigen 2-Gigawatt-Generation von Offshore-Anbindungen. Damit leistet Amprion einen wesentlichen Teil zum effizienten und zügigen Umbau des Energiesystems, um große Mengen Windenergie nach Nordrhein-Westfalen zu bringen“, sagt Peter Barth, Geschäftsführer der Amprion Offshore GmbH.

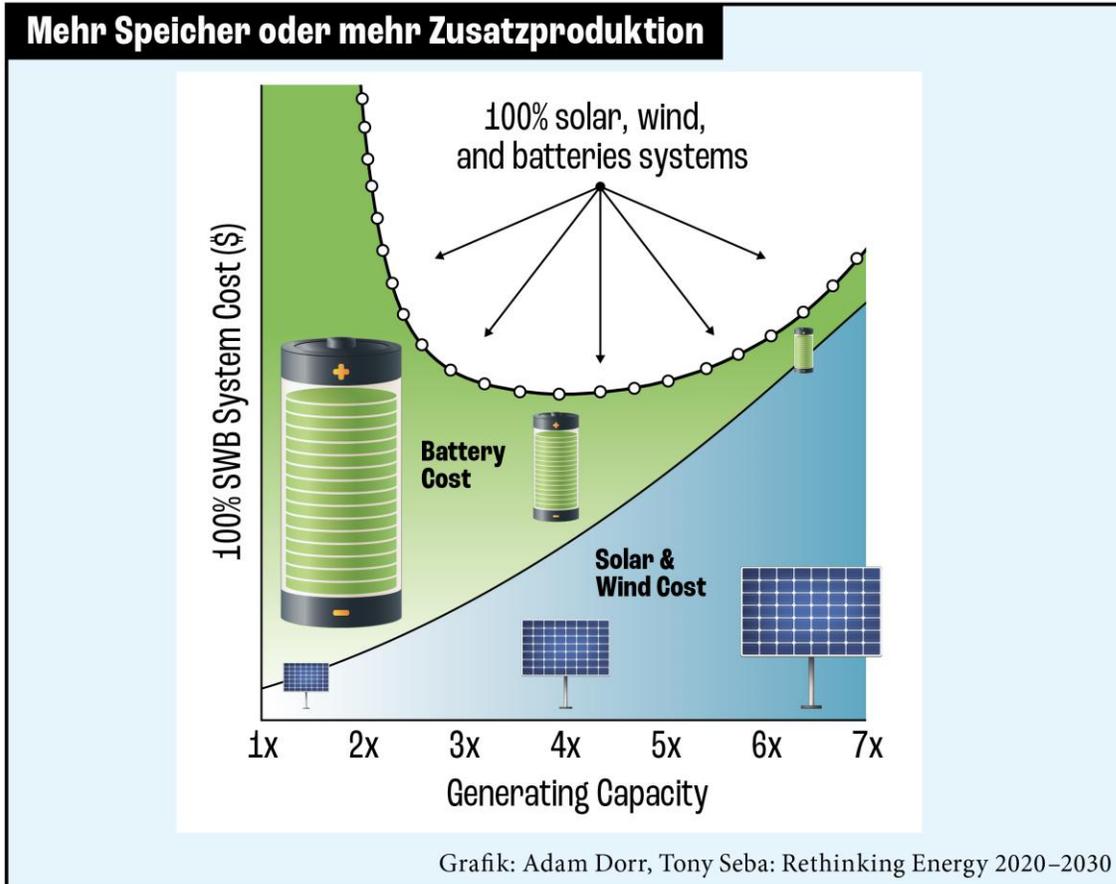


Der Energiekorridor Windader West (für eine größere Version bitte [hier klicken](#))

Acht Strategien für Versorgungssicherheit und Integration von erneuerbaren Energien, die sich ergänzen

1. Vernetzung mit Ausgleichseffekten
2. **Strategische Überproduktion (ggf. mit Abregelung)**
3. Diversifikation der Herkunft & der Ressourcen
4. Speicher (Energie- und Leistungs-Reserven)
5. «Smart grids» mit Leistungs- und Lastmanagement
6. Tarifmodelle für Energiespeicher Lastabwurf
7. In Notfällen I: strategische Reserven (Speicherung und Vorratshaltung ausserhalb des Marktes)
8. In Notfällen II: Rückgriff auf fossile Reserven

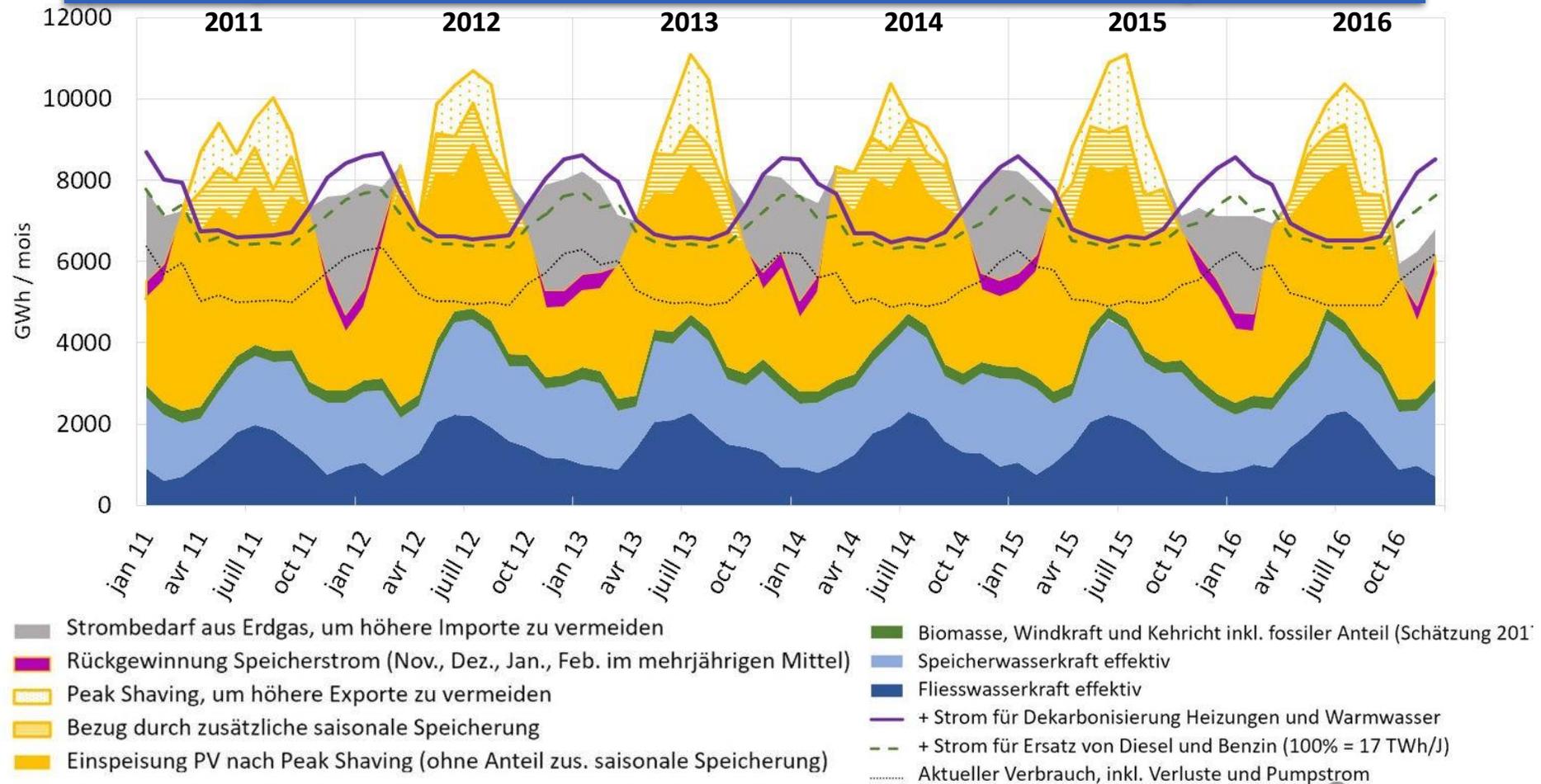
Batterien und strategische Überproduktion sind Substitute



**Strategische Überproduktion:
Kapazitätsausbau substituiert zusätzliche
Speicher**

Um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten muss bei den Investitionen ein Optimum zwischen mehr Stromerzeugung und mehr Speicherung gefunden werden (Dorr & Seba). Weil sich Solarstrom stark verbilligt hat, sei es billiger, mehr Strom zu produzieren und einen Teil davon abzuregeln, als teure Speicher zu bauen.

Modell Roger Nordmann: Abregeln der Leistungsspitzen billiger als Speicher Modulierung der Last, erneuerbar gedeckt, synthetisches Methan deckt Teilbedarf im Winterhalbjahr



Source: Nordmann R., Le Plan solaire, 2019

Dieses Szenario "nur Solarenergie + fossiler Strom" = worst case

Für Wärme, Mobilität und Strom (ohne Industrie und Luftfahrt).

-100 % fossil für Heizung und Verkehr (elektrifiziert)

+ 14 % fossil für Strom im Winter.

= -86 % fossil.

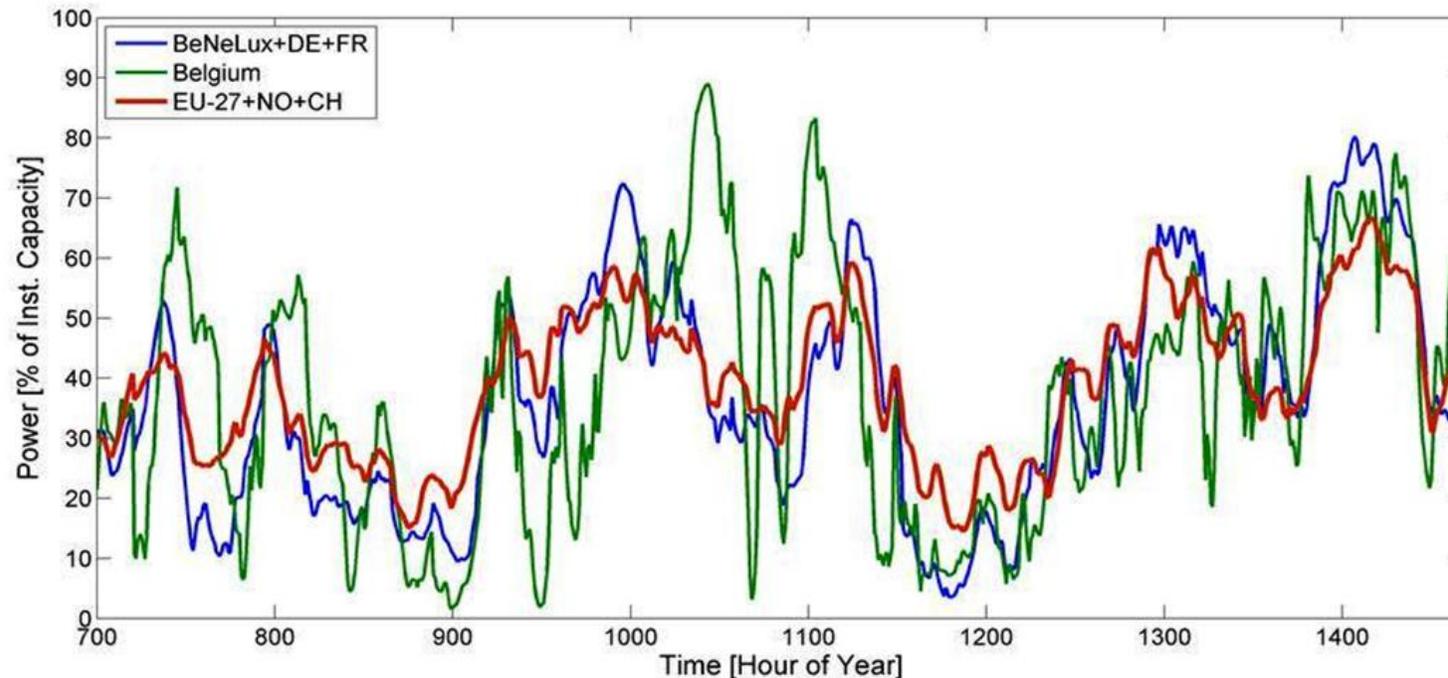
Acht Strategien für Versorgungssicherheit und Integration von erneuerbaren Energien, die sich ergänzen

1. Vernetzung mit Ausgleichseffekten
2. Strategische Überproduktion (ggf. mit Abregelung)
3. **Diversifikation der Herkunft der Ressourcen & der Technologie**
4. Speicher (Energie- und Leistungs-Reserven)
5. «Smart grids» mit Leistungs- und Lastmanagement
6. Tarifmodelle für Energiespeicher Lastabwurf
7. In Notfällen I: strategische Reserven (Speicherung und Vorratshaltung ausserhalb des Marktes)
8. In Notfällen II: Rückgriff auf fossile Reserven

Ausgleichseffekte über die «europäische Kupferplatte» / CH: Stromabkommen fehlt

Spatial Smoothing Effects

Belgium / Mid-West EU / EU+No+CH



Beispiel Monat Februar

Quelle: Modelling of Wind Speed Fields over Europe and Power Correlations in a 400 GW Scenario,

EWEC European wind energy conference 2011

Ausgleichseffekte durch hybride Produktion: Kombination Wind/Sonne/ Batterie



«Im Energiepark „Haringvliet“ werden Wind, Sonne und Batterien miteinander kombiniert.

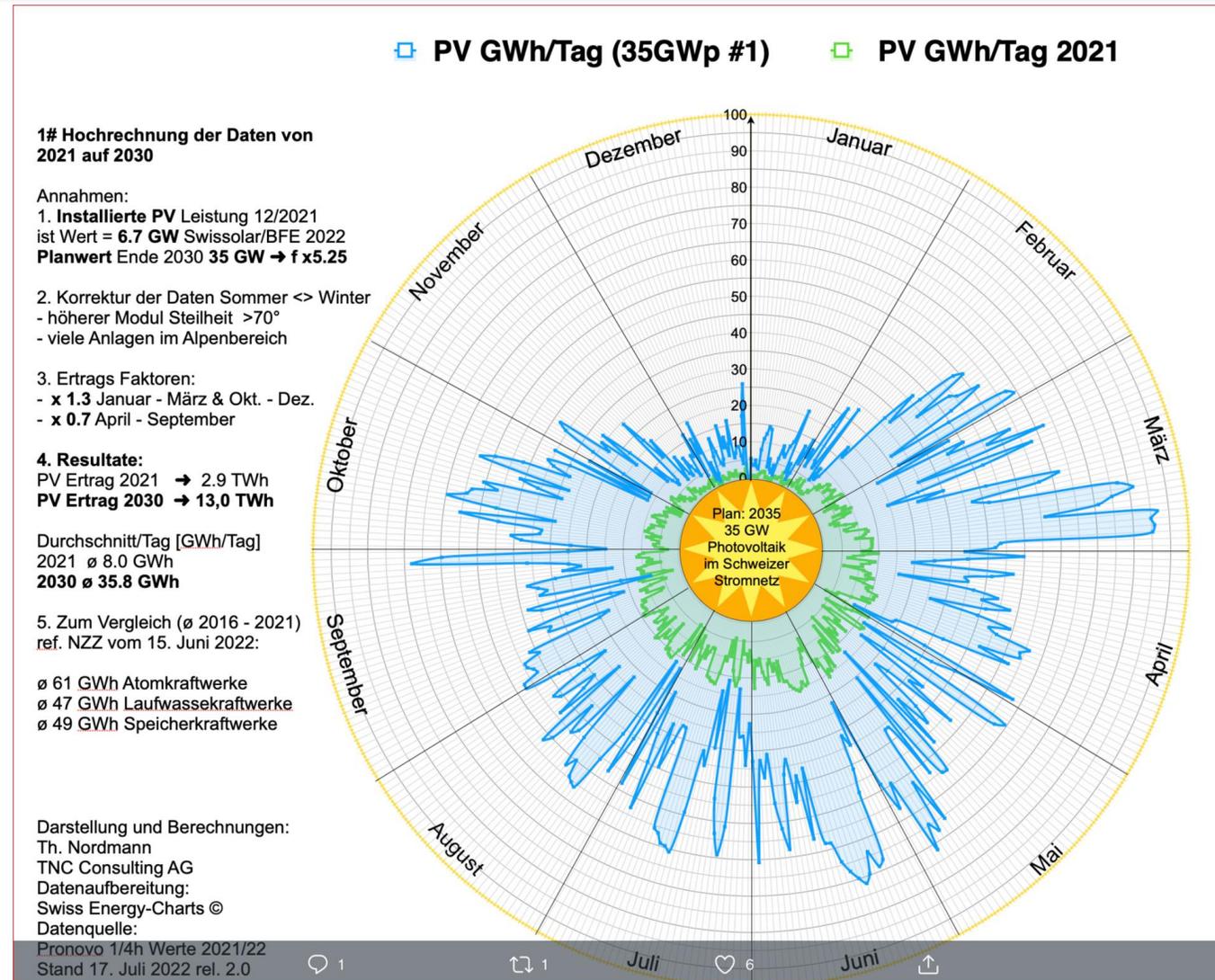
Das HYBRID-KRAFTWERK zur Erzeugung und Speicherung erneuerbarer Energien steht in der Region „Goeree-Overflakkee“ in der Provinz Süd-Holland rund 50 Kilometer südwestlich von Rotterdam.

Vattenfall sieht darin auch eine Blaupause für zukünftige Projekte.»

<https://group.vattenfall.com/de/newsroom/pressemitteilungen/2022/energiepark-haringvliet-eroeffnet>

Photovoltaik im Mittelland: Starkes Profil von Mitte Feb bis Mitte November

Alpine Standorte mit viel Winterstrom wurden lange verhindert



Mont Soleil: 30 Jahre Messwerte / 1200 m ü.M.: Mehr Winterstrom dank nebefreiem Standort

PV-Anlage Mont Soleil



Beispiel Mont Soleil

**Winteranteil
40% der
Produktion**

Bild: BKW

Die PV-Anlage auf dem Mont Soleil (560 kW) nahm im Februar 1992 als damals grösste Photovoltaikanlage Europas den Betrieb auf. Der Produktionsanteil im Winterhalbjahr beträgt 40 Prozent. Sie lieferte im 28. Betriebsjahr (2020) 685'000 kWh Elektrizität.

Acht Strategien für Versorgungssicherheit und Integration von erneuerbaren Energien, die sich ergänzen

1. Vernetzung mit Ausgleichseffekten
2. Strategische Überproduktion (ggf. mit Abregelung)
3. Diversifikation der Herkunft der Ressourcen & der Technologie
4. Speicher (Energie- und Leistungs-Reserven)
5. «Smart grids» mit Leistungs- und Lastmanagement
6. Tarifmodelle für Energiespeicher Lastabwurf
7. In Notfällen I: strategische Reserven (Speicherung und Vorratshaltung ausserhalb des Marktes)
8. In Notfällen II: Rückgriff auf fossile Reserven

Schweiz ist sehr privilegiert dank den Wasserspeichern

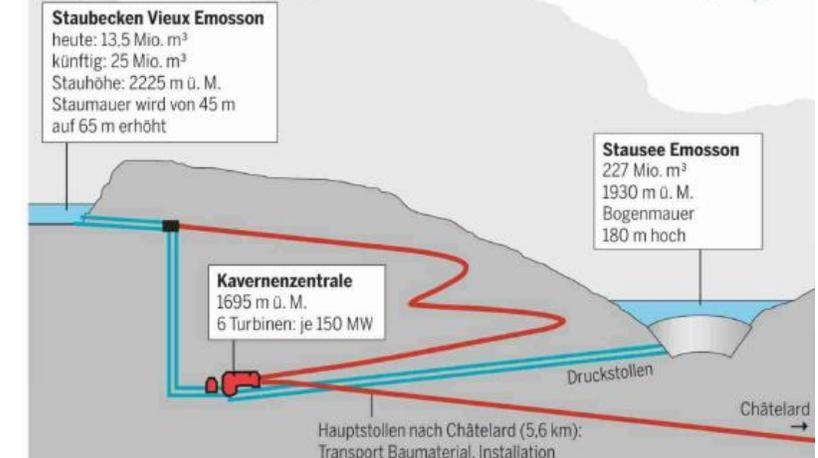
mehr Leistung von bestehenden Staubecken



Quelle: Nant de Drance / Emosson

Pumpspeicherkraftwerk Nant de Drance

Leistung: 900 MW
 Baubeginn: 2008, Inbetriebnahme: 2017
 Kosten: 1,8 Mrd. Fr.

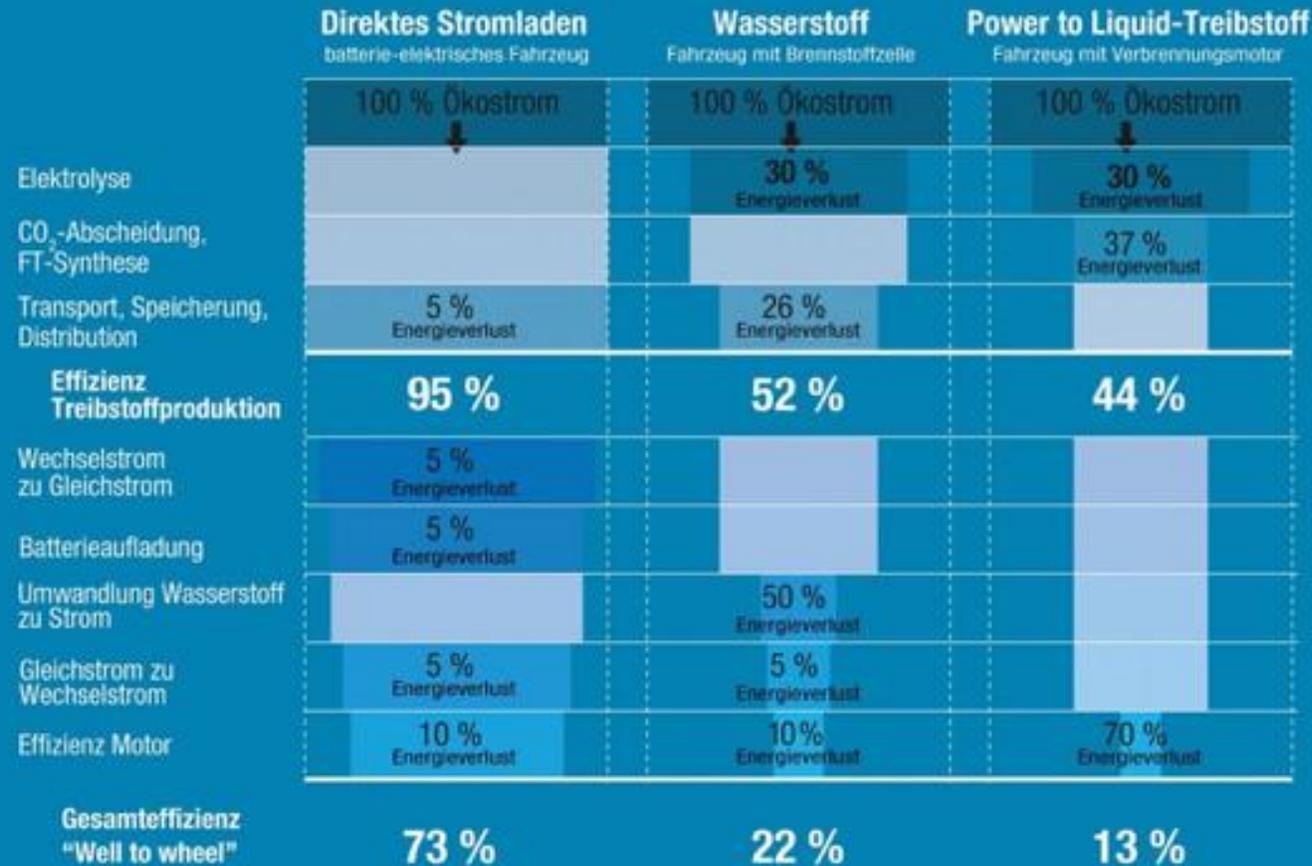


Europa: Speicherkapazitäten einiger Länder

	AT	CH	DE	NO	SE
Kapazität von Wasserkraftwerken [MW]	12.919	13.728	9.790	31.004	16.735
- Speicherwasserkraftwerke	3.744	8.078	335	23.405	10.802
- Pumpspeicherkraftwerke	3.781	1.839	6.521	1.344	108
- Laufwasserkraftwerke	5.395	3.810	2.934	6.255	5.825

Batterien sind sechsmal effizienter als Wasserstoff

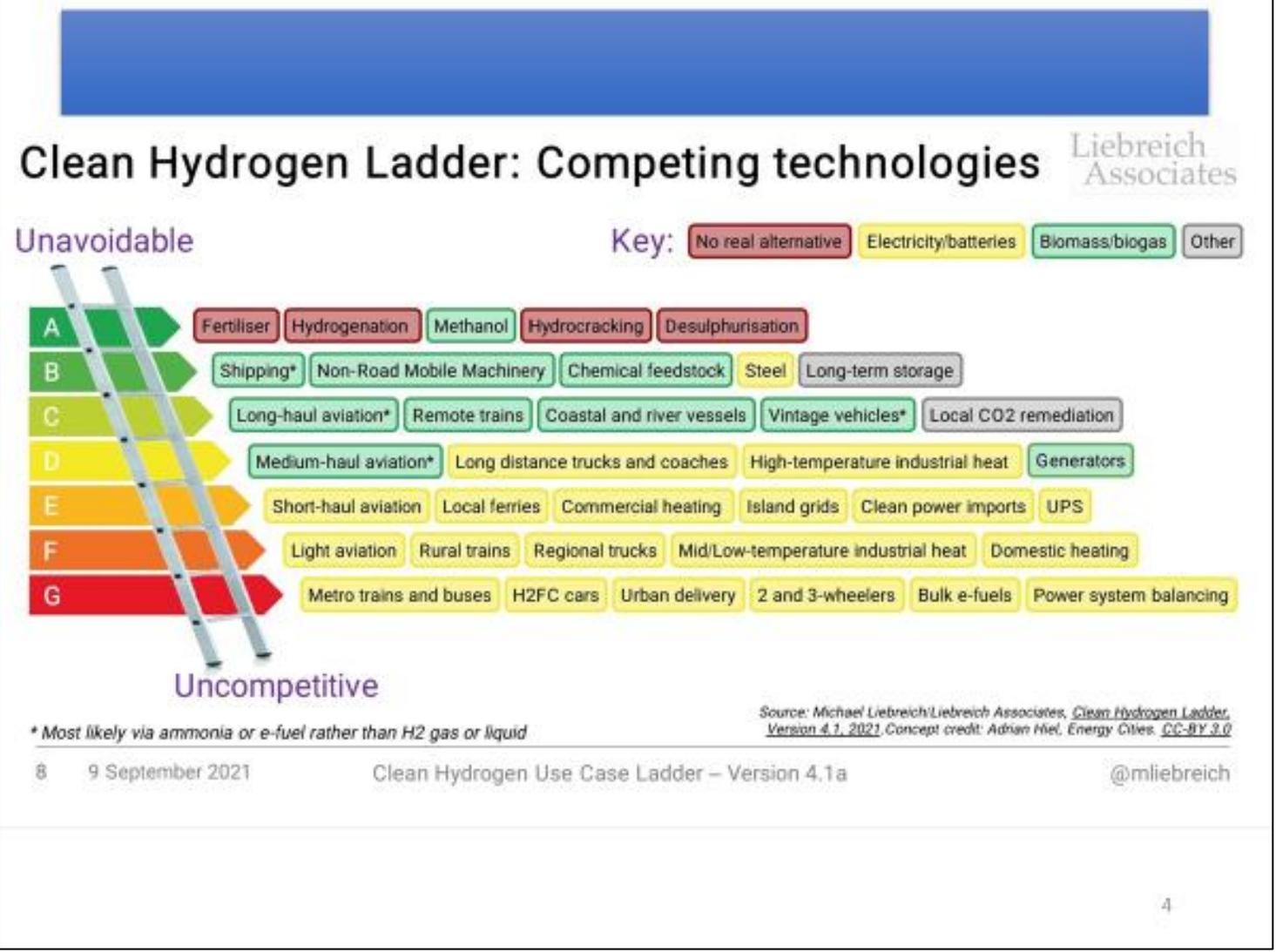
Hohe Gesamt-Effizienz bei E-Auto mit Batterie



Rolle von Wasserstoff ist stark umstritten

Schätzungen der Bedeutung schwanken zwischen weniger als 1 % des Verbrauchs bis zu 30%

Grüner Wasserstoff (inkl. Derivate) ist sinnvoll für Basischemie, evtl. auch im Flug- und Schiffsverkehr



Wasserstoff ist eine logistische Herausforderung

H2-Transport in gewandelter Form (Methanol, Ammoniak) deutlich billiger

Flüssiger Wasserstoff (Studie)

- Here is a proposed design for a hydrogen carrier, the GAIA, by naval design studio C-Job. It would carry 37,000 m³ of liquid hydrogen. <https://c-job.com/projects/liqui>



<https://c-job.com/projects/liquid-hydrogen-tanker/>

Flüssiges Erdgas (7fache Kapazität im Vergleich mit Wasserstoff)

Here is a Q-Max LNG carrier, capacity 263,000 m³, 7x as much as the Gaia. Because LNG has 2.6 times the volumetric energy density of hydrogen, it carries 18 times as much energy, with 10% used in liquefaction, not 30%. It has enough freeboard to cross the Atlantic. And it exists!



Speicherinhalt der CH Speicherbecken bei 8815 GWh

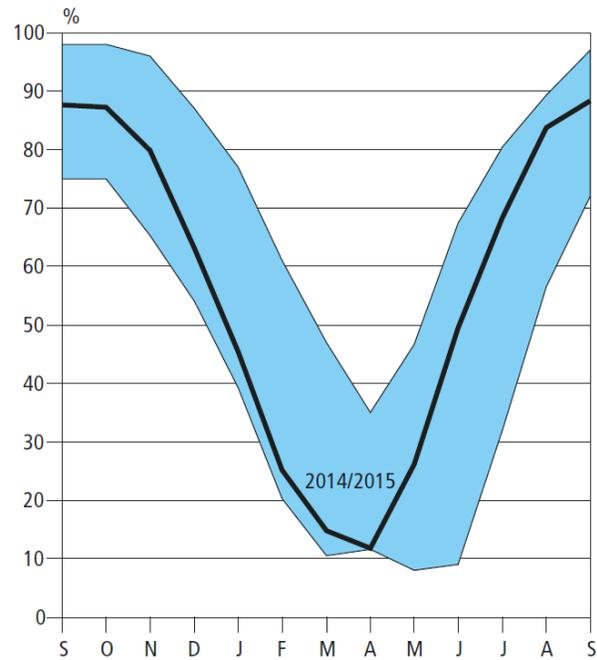


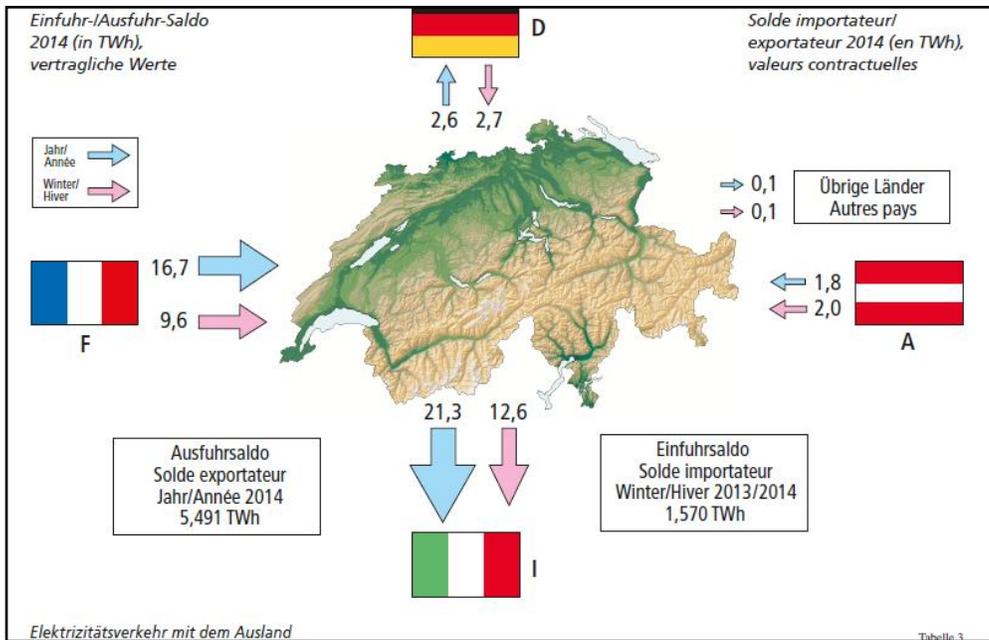
Fig. 13
Verlauf des Speicherinhalts (Stand Ende Monat)

Fig. 13
Variation du contenu des bassins d'accumulation
(à la fin du mois)

Schwankungsbreite der hydrologischen Jahre
1972/1973–2014/2015

Ecarts au cours des années hydrologiques
1972/1973–2014/2015

Batterien werden zwar immer billiger, aber für eine Saisonspeicherung sind sie wenig geeignet

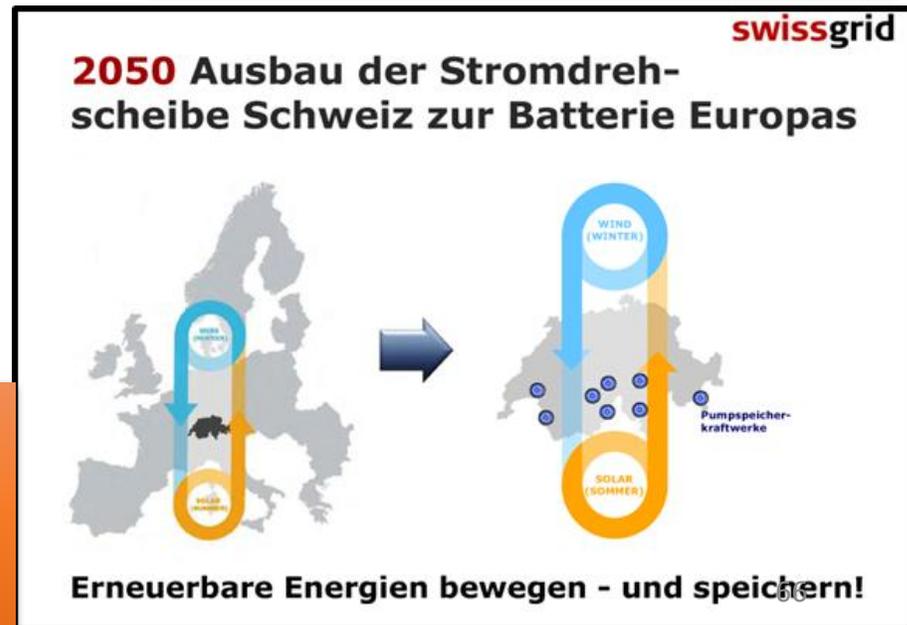


Heute: französischer Atomstrom und deutscher Kohle- und Solarstrom werden zwischengelagert / veredelt und nach Italien weitergeliefert.

Morgen: europäische Wind- und Solarstrom wird in der Schweiz zwischengelagert bzw. veredelt und nach ganz Europa weitergeliefert.

Stromdrehscheibe bisher
Kombination von Transport und Speicherung für Atom/Kohle-Strom-Überschüsse

Stromdrehscheibe morgen operiert mit Wasser- + Wind- + Sonnenstrom



Acht Strategien für Versorgungssicherheit und Integration von erneuerbaren Energien, die sich ergänzen

1. Vernetzung mit Ausgleichseffekten
2. Strategische Überproduktion (ggf. mit Abregelung)
3. Diversifikation der Herkunft der Ressourcen & der Technologie
4. Speicher (Energie- und Leistungs-Reserven)
5. «Smart grids» mit Leistungs- und Lastmanagement
6. Tarifmodelle für Energiespeicher Lastabwurf
7. In Notfällen I: strategische Reserven (Speicherung und Vorratshaltung ausserhalb des Marktes)
8. In Notfällen II: Rückgriff auf fossile Reserven

Digitalisierung: intelligente Kommunikation für Netze und Geräte, koordiniert Angebot und Nachfrage

Smart Grid: Verteilt saubere Energien und steuert den Verbrauch: Ein- und Ausschalten von Boilern, Heizungsspeichern, Kühlanlagen, Waschmaschinen, Batterien usw.



Acht Strategien für Versorgungssicherheit und Integration von erneuerbaren Energien, die sich ergänzen

1. Vernetzung mit Ausgleichseffekten
2. Strategische Überproduktion (ggf. mit Abregelung)
3. Diversifikation der Herkunft der Ressourcen & der Technologie
4. Speicher (Energie- und Leistungs-Reserven)
5. «Smart grids» mit Leistungs- und Lastmanagement
6. **Tarifmodelle für Energiespeicher Lastabwurf**
7. In Notfällen I: strategische Reserven (Speicherung und Vorratshaltung ausserhalb des Marktes)
8. In Notfällen II: Rückgriff auf fossile Reserven

Flexible Tarife

- Nur gangbar für Endkunden mit Marktzugang
- Verteilnetzbetreiber bieten heute Einheitstarife an
 - Falsche Anreize
 - Wenig Möglichkeiten zur rentablen Verwertung von Stromüberschüssen und zur Netzentlastung bei Knappheit.
- Anreiz zu Eigenverbrauch ist allenfalls intakt bei Endverbrauchern mit PV-Anlagen

Acht Strategien für Versorgungssicherheit und Integration von erneuerbaren Energien, die sich ergänzen

1. Vernetzung mit Ausgleichseffekten
2. Strategische Überproduktion (ggf. mit Abregelung)
3. Diversifikation der Herkunft der Ressourcen & der Technologie
4. Speicher (Energie- und Leistungs-Reserven)
5. «Smart grids» mit Leistungs- und Lastmanagement
6. Tarifmodelle für Energiespeicher Lastabwurf
7. In Notfällen I: strategische Reserven (Speicherung und Vorratshaltung ausserhalb des Marktes)
8. In Notfällen II: Rückgriff auf fossile Reserven

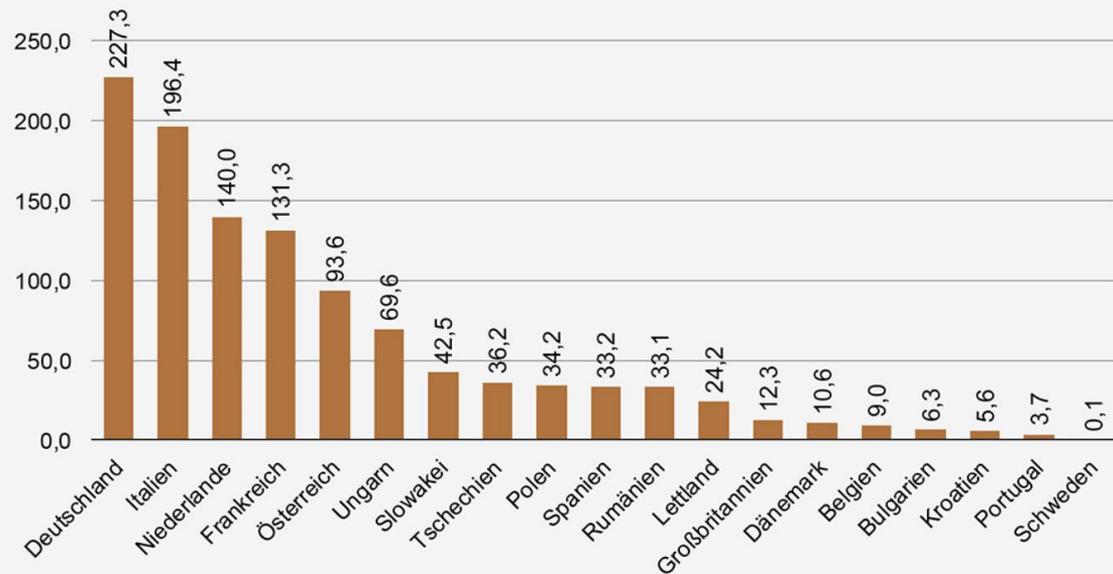
Was sind strategische Reserven?

- Energie- und Leistungsreserven des Übertragungsnetzbetreibers (CH: Swissgrid)
- Werden nicht gehandelt, nehmen nicht am Markt teil.
- Stehen ausschliesslich für Notfälle zur Verfügung
- Zugriff ist eine hoheitliche Entscheidung (nicht marktgetrieben)

Gase sind als Reserve am besten geeignet: kurze Ramping-Fristen, Lager in vielen Ländern bereits vorhanden

Deutschland mit EU-weit höchsten Speicherkapazitäten für Erdgas

Arbeitsgasvolumen in Mrd. kWh



Die Speicherkapazitäten für Erdgas können künftig auch für grüne Gase genutzt werden.

Dies setzt das Auftreten von Strom-Überschüssen voraus. Dadurch entsteht ein sehr grosser Beitrag zur Flexibilisierung und Absicherung der Energiewende.

In Untergrund-Kavernenspeichern, die fast zwei Drittel des Volumens der deutschen Gasspeicher ausmachen, kann das Äquivalent von 10-20% des jährlichen Stromverbrauchs gespeichert werden.

Es entsteht eine Rücklage für saisonale Schwankungen in der Stromerzeugung oder bei Spitzen-Wärmebedarf.

Die wichtigste Lösung bleibt aber die Optimierung von Sommer- und Winterstrom-Erzeugung durch optimierte Investitionen in Sonnen- und Windenergie;

Lange Dunkelflauten sind selten und dauern maximal 10 Tage.

Key Take-aways Versorgungssicherheit & Integration

- **Enormes Wachstum bei PV ist zu erwarten: von 3,5 auf 35-40 TWh**
 - PV-Erzeugung muss integriert oder abgeregelt werden.
 - Dafür braucht es Batterien, ein dynamisches Tarifsysteem, das die witterungsbedingten Marktverhältnisse spiegelt und
 - weitere Speicher (zB. Wärmespeicher)
 - Starke Netze
- **PV-Abdeckung der Nachtstunden mittels Batterien**
 - schont die natürlichen Speicherseen bis weit in den Herbst
 - Damit bleiben mehr Energiereserven für den Hochwinter (Dez/Jan).
- **Batterien**
 - Hausbatterien (dezentral)
 - Fahrzeugbatterien (gekoppelt an Ladeinfrastruktur)
 - Quartierbatterien (Netzbetreiber als Akteur)
- **Biomasse, Windkraft und (vorerst noch) fossile Speicher als Ergänzung zur Schliessung der Winterlücke**

Der reale «game changer» bei den Speichern sind die Batterien von Elektrofahrzeugen

- Exponentielles Wachstum
 - Verdoppelung alle zwei Jahre
- real existent
 - Nahe beim Verbrauch
 - Keine Zusatzinvestitionen nötig
- Kombinierte Anwendungen mobil/stationär
 - Second life: Wiederverwertung von alten Autobatterien als stationäre Batterien
 - Vehicle to grid, Rücklieferung von Fahrzeug