

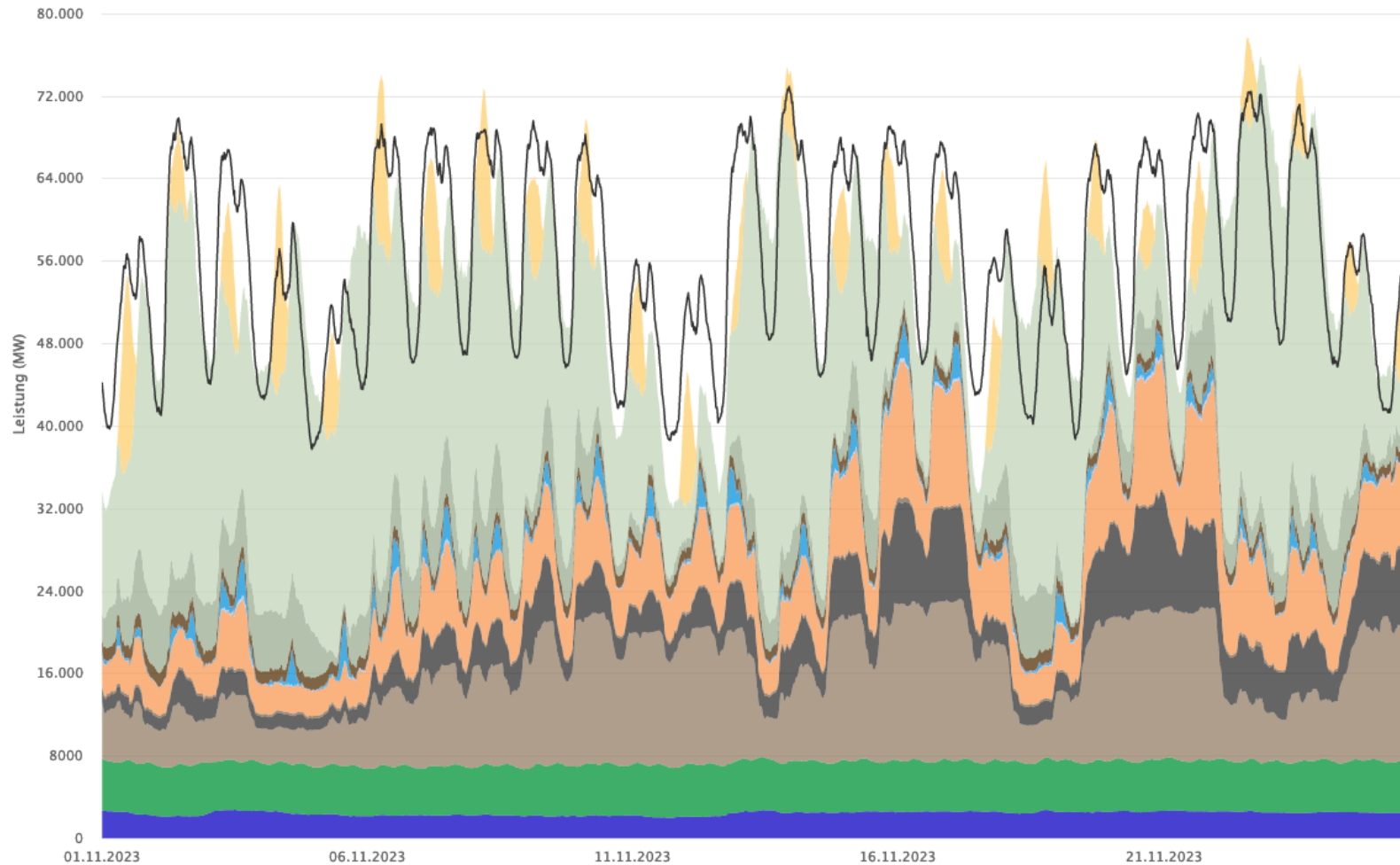
Zukunftswerkstatt: Die Energiewende mitgestalten Impuls Energiespeicher

Prof. Dr.-Ing. Christof Wittwer (Fraunhofer ISE)
Pädagogische Hochschule Freiburg
Statusworkshop „innolab-bbew“

25.06.2024

Ergebnisse aus der Energiesystemanalyse

Transparenz für die Netze: Energy-Charts:



- Erzeugung in Deutschland und Europa "energy-charts"
- Datenverfügbarkeit durch Markttransparenz EEX/ENTSO-E



<https://www.energy-charts.info/charts/power/chart.htm?l=de&c=DE&interval=month>
<https://transparency.entsoe.eu/> <https://www.eex.com/de/marktdaten>

FHG-SK: Public

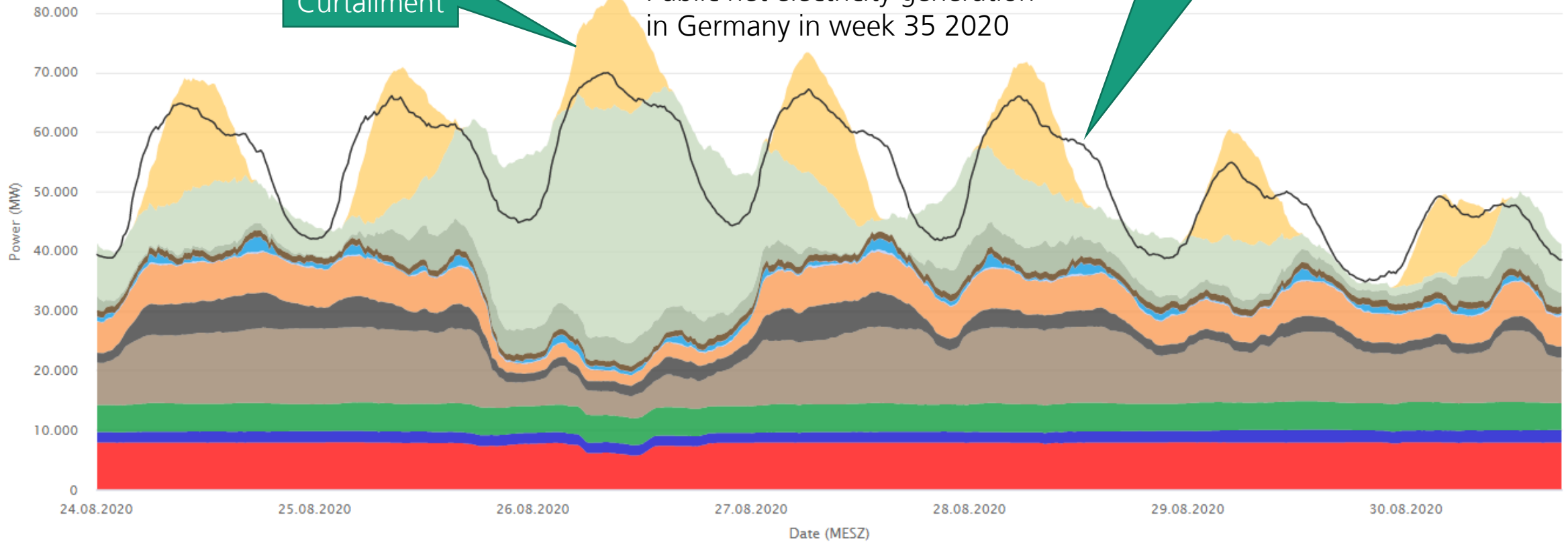
Energiesystemanalyse

Energy-Charts:

VRE surplus
->
Curtailment

Energy deficit ->
loss of load

Public net electricity generation in Germany in week 35 2020



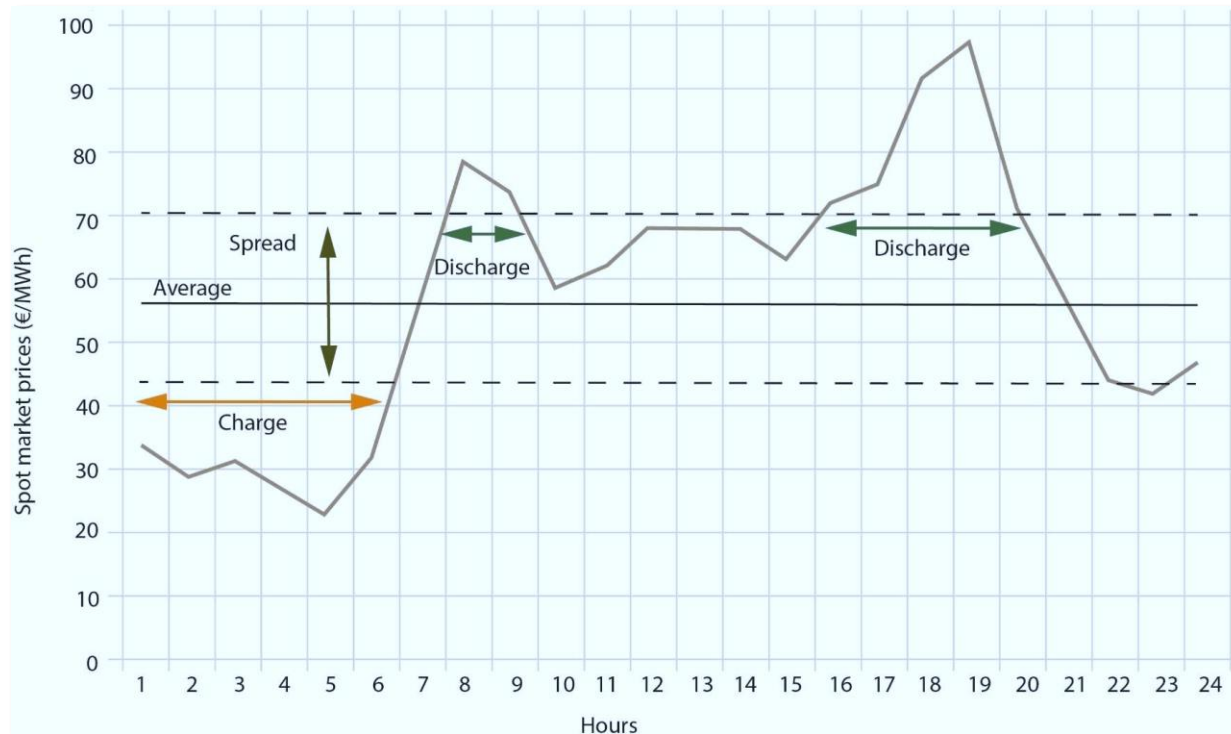
- Hydro pumped storage consumption
- Fossil brown coal / lignite
- Hydro water reservoir
- Wind onshore
- Renewable share of load
- Import Balance
- Fossil hard coal
- Hydro pumped storage
- Solar
- Nuclear
- Fossil oil
- Others
- Load
- Hydro Run-of-River
- Fossil gas
- Waste
- Residual load
- Biomass
- Geothermal
- Wind offshore
- Renewable share of g

Source: Fraunhofer ISE
Energy Charts 2022

High amounts of flexibility needed to balance demand and supply in the future decarbonized power system!

Energiehandel mit "Arbitrage"

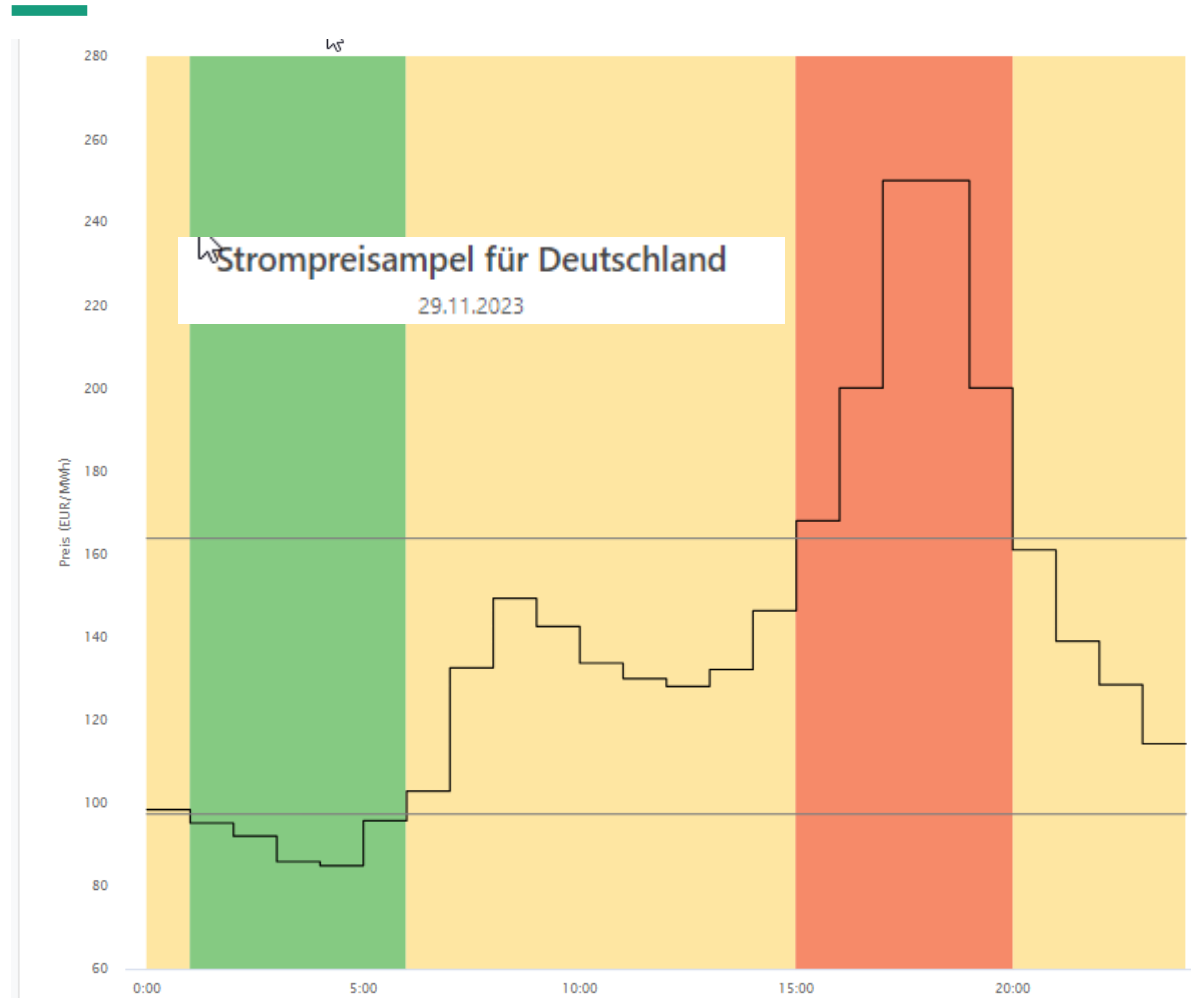
Energy Trading



- Arbitrage: „Vorteile durch Preisdifferenzen am Strommarkt“
- Tagesschwankungen gut speicherbar
- Vorhersagen für Preisentwicklungen sind notwendig
- Preisspreizung muss hoch genug sein

Ergebnisse aus der Energiesystemanalyse

Transparenz für die Netze: EnergyCharts: Strompreisampel, Anteil EE im Netz



- **Transparenz** von Strompreis und Anteil EE
- 29.11.2023: Day-Ahead-Preis zwischen 84 und 250 EUR/MWh
- Hohe **Preisdynamik** am Markt ist Ausdruck und Chance für **Flexibilitätsmanagement** mittels sektorengekoppelter **Smart Grids**
- Hohe Kosten im Netz durch **Netzengpässe** und notwendige Redispatch Maßnahmen

https://energy-charts.info/charts/consumption_advice/chart.htm?l=de&c=DE&datetimepicker=29.11.2023&source=price_traffic_light

FHG-SK: Public

<https://energy-charts.info/charts/redispatch/chart.htm?l=de&c=DE&interval=year>

Batterien in Kalifornien

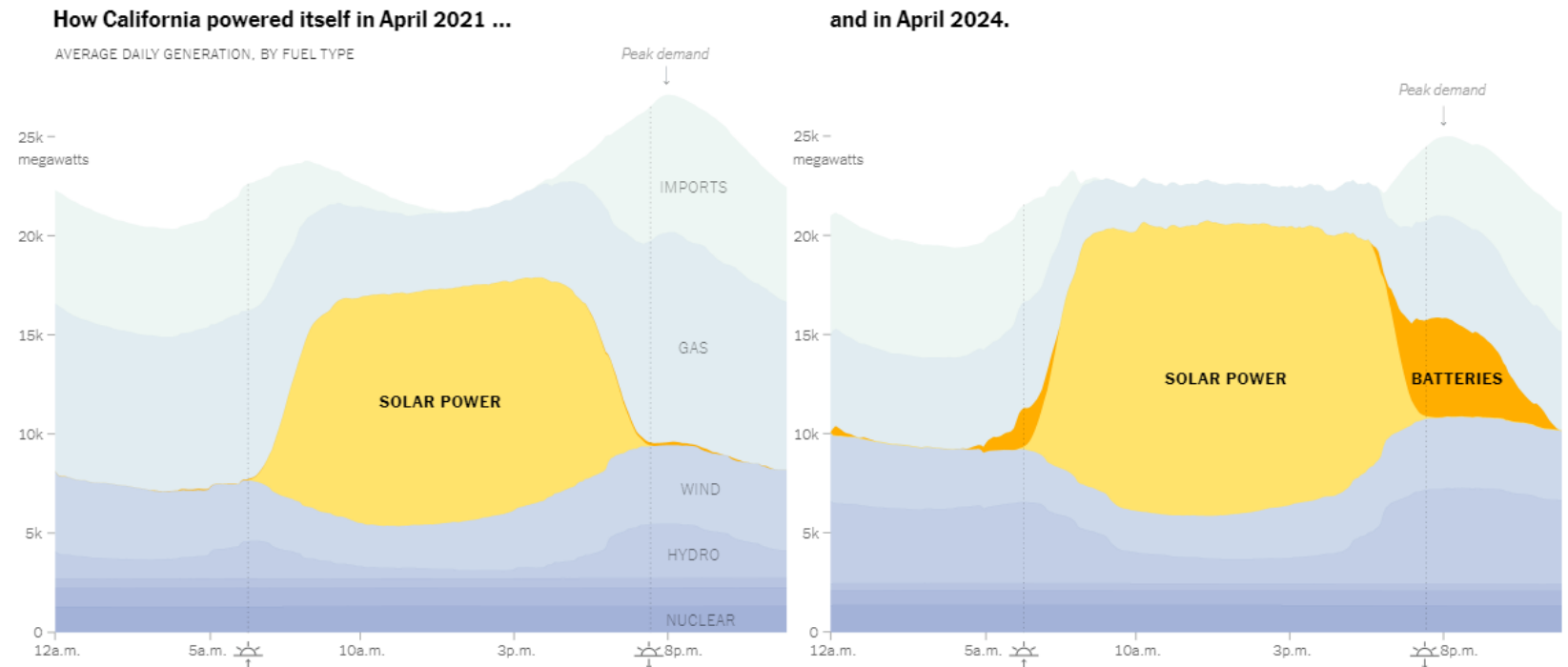
PV, Batteriezubau

- Netzbelastung
- Batteriespeicher im GW-Maßstab

Giant Batteries Are Transforming the Way the U.S. Uses Electricity

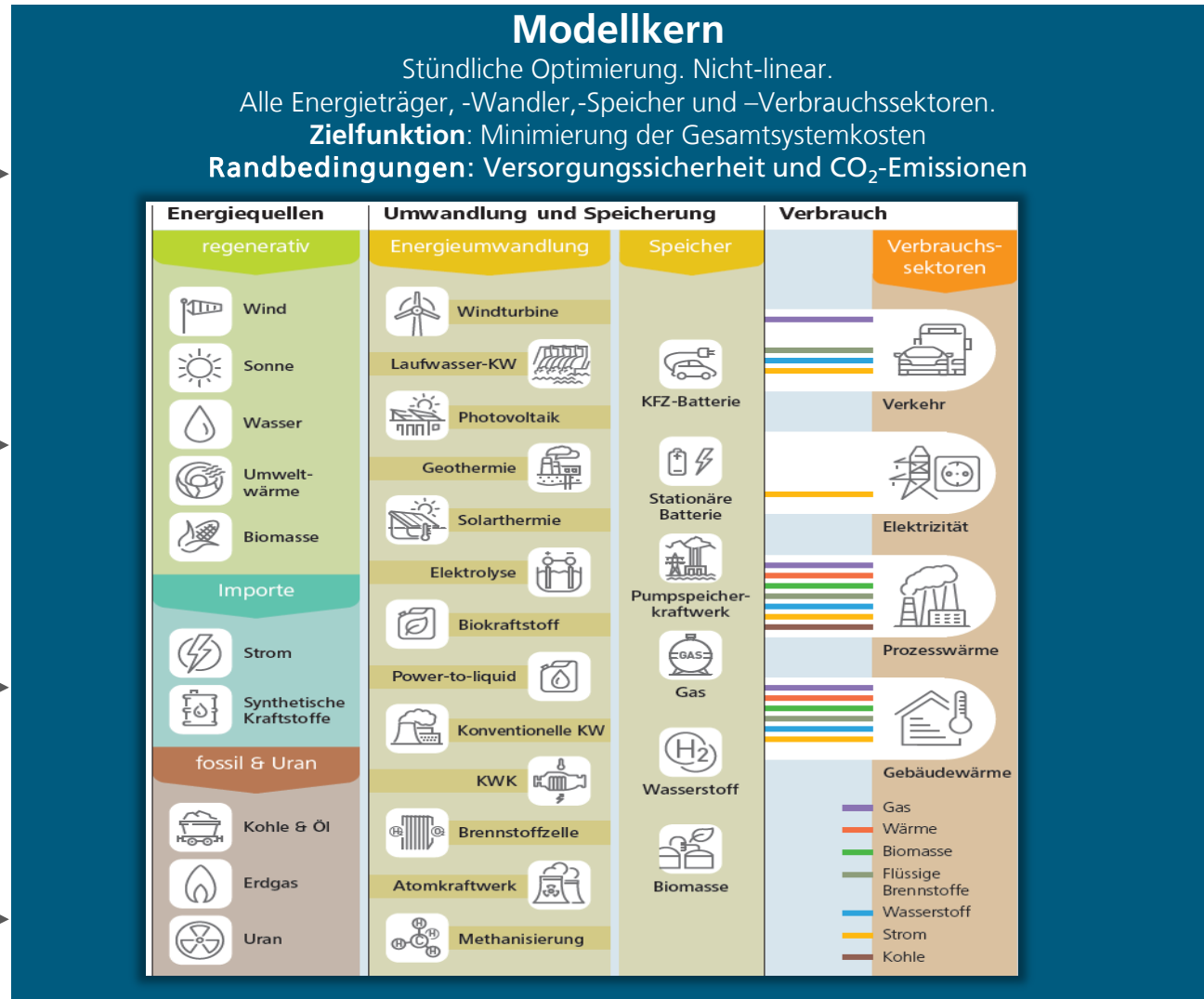
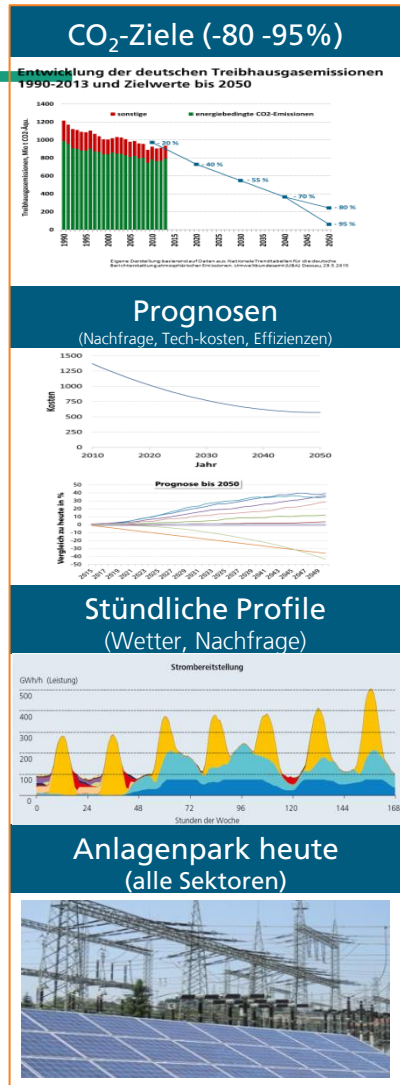
They're delivering solar power after dark in California and helping to stabilize grids in other states. And the technology is expanding rapidly.

By Brad Plumer and Nadja Popovich May 7, 2024



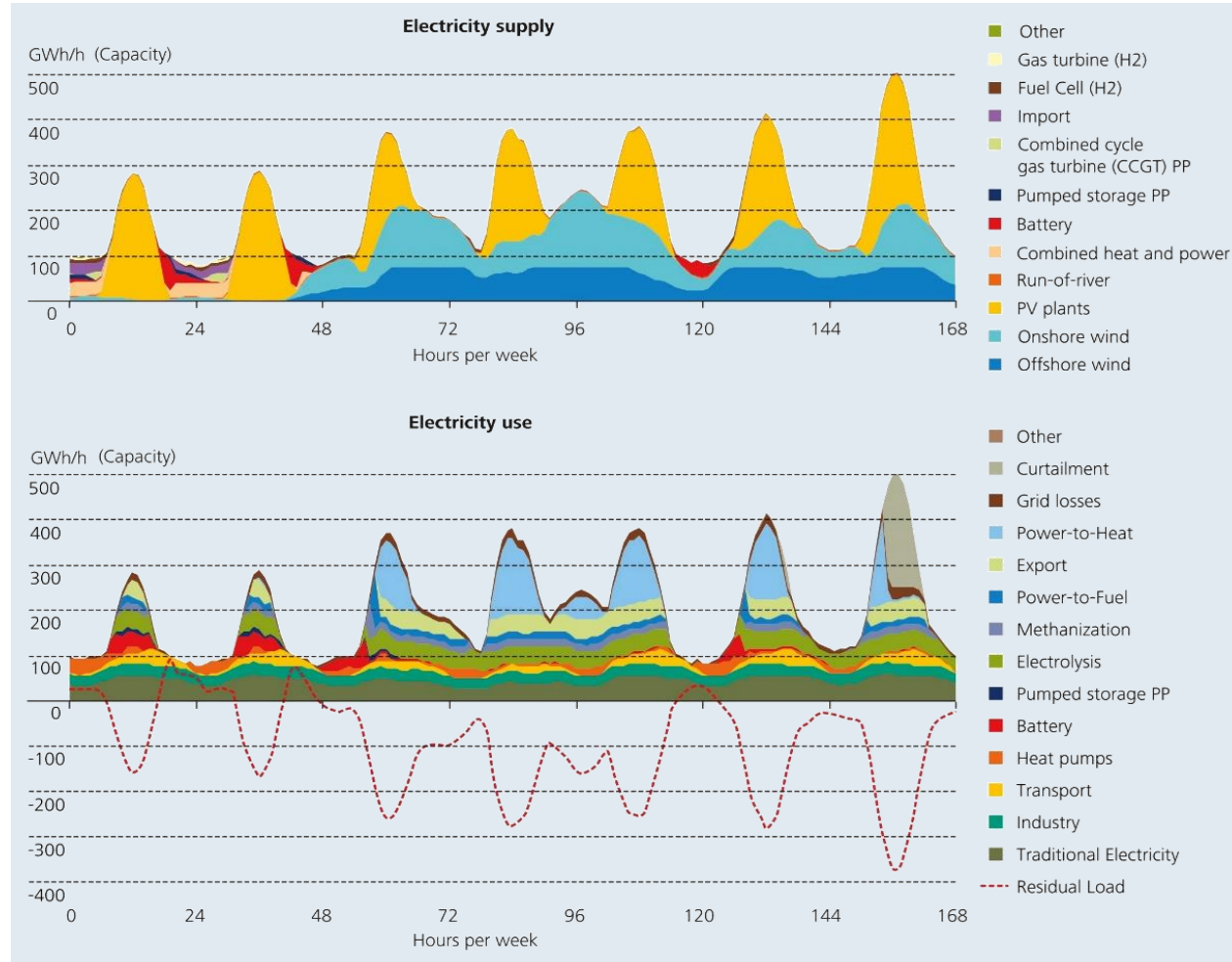
Source: <https://www.nytimes.com/interactive/2024/05/07/climate/battery-electricity-solar-california-texas.html>

REMod – Sektorenübergreifendes Energiesystemmodell

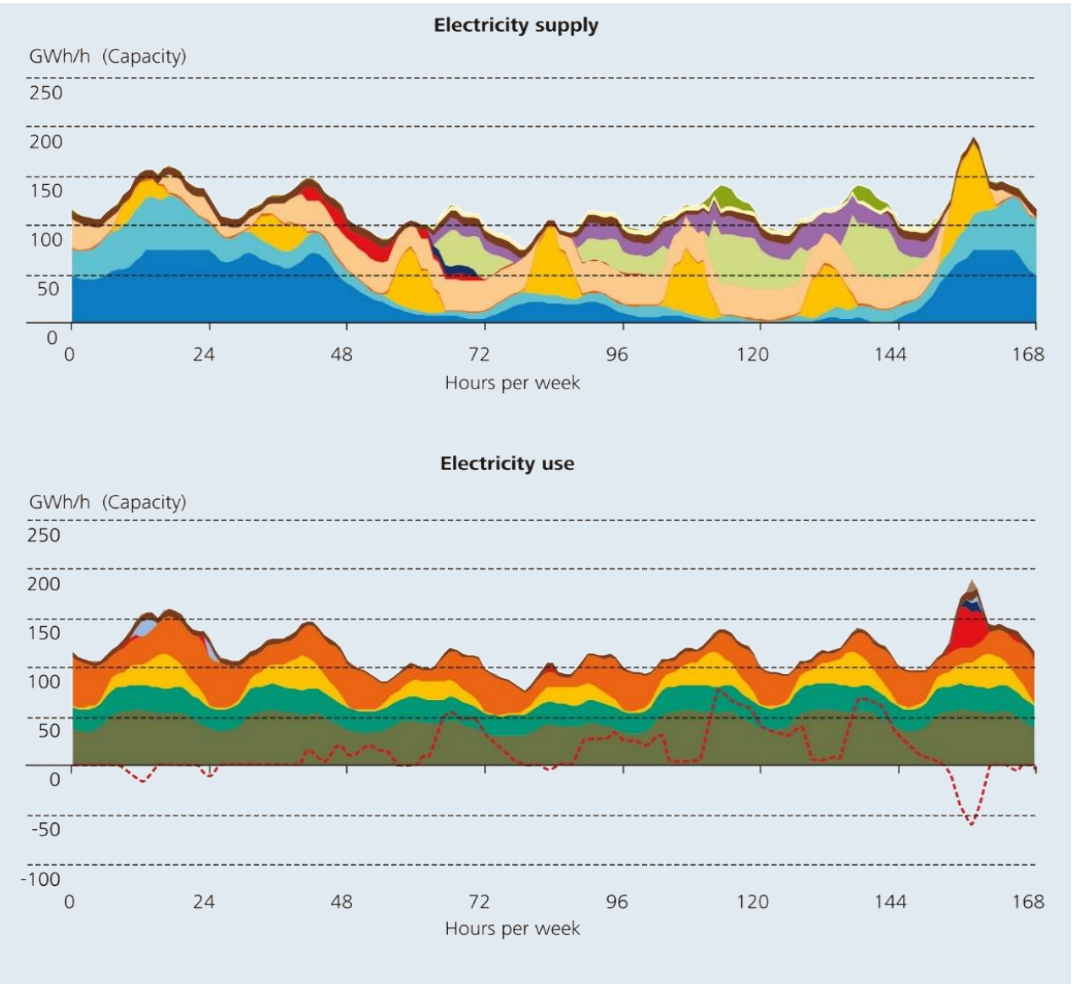


Betrieb des Systems

Woche im April 2045



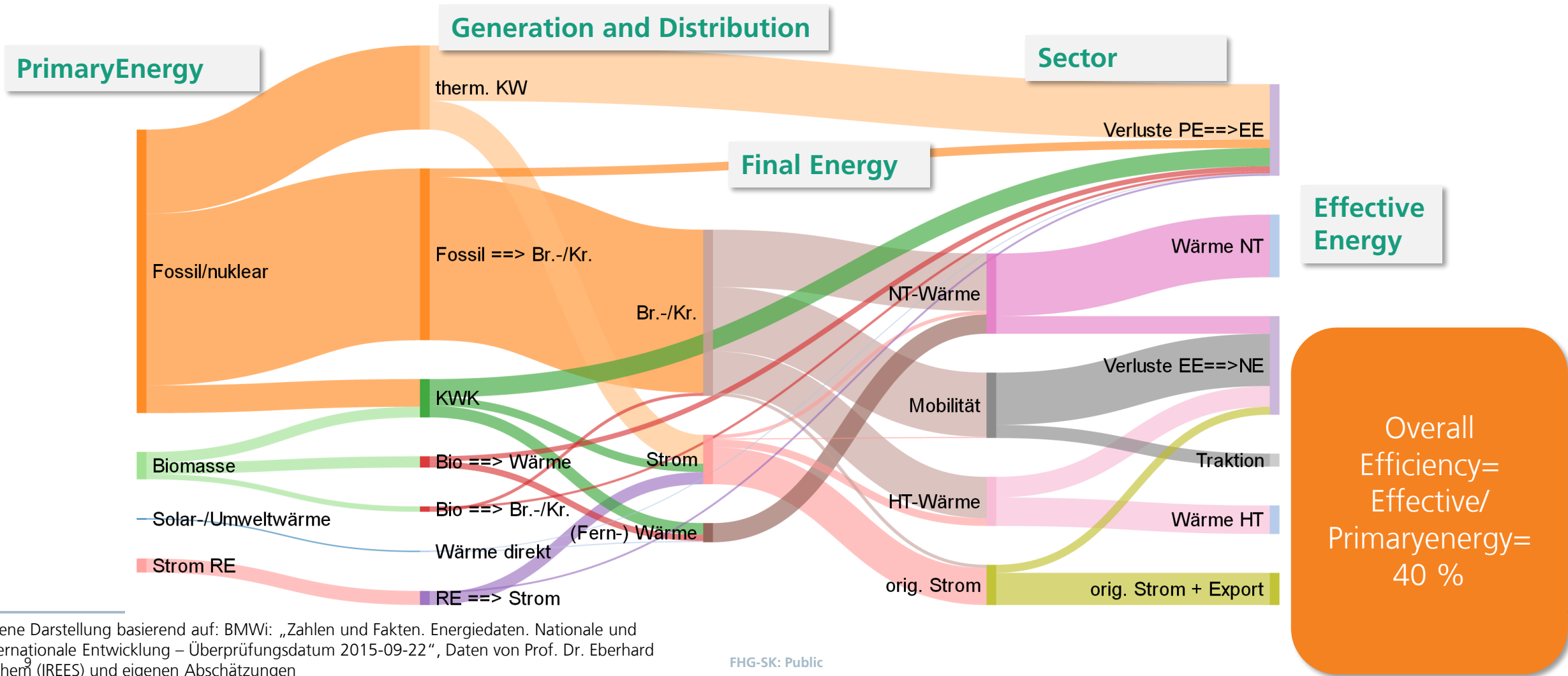
Woche im Oktober 2045



Daten des Referenz-Szenario

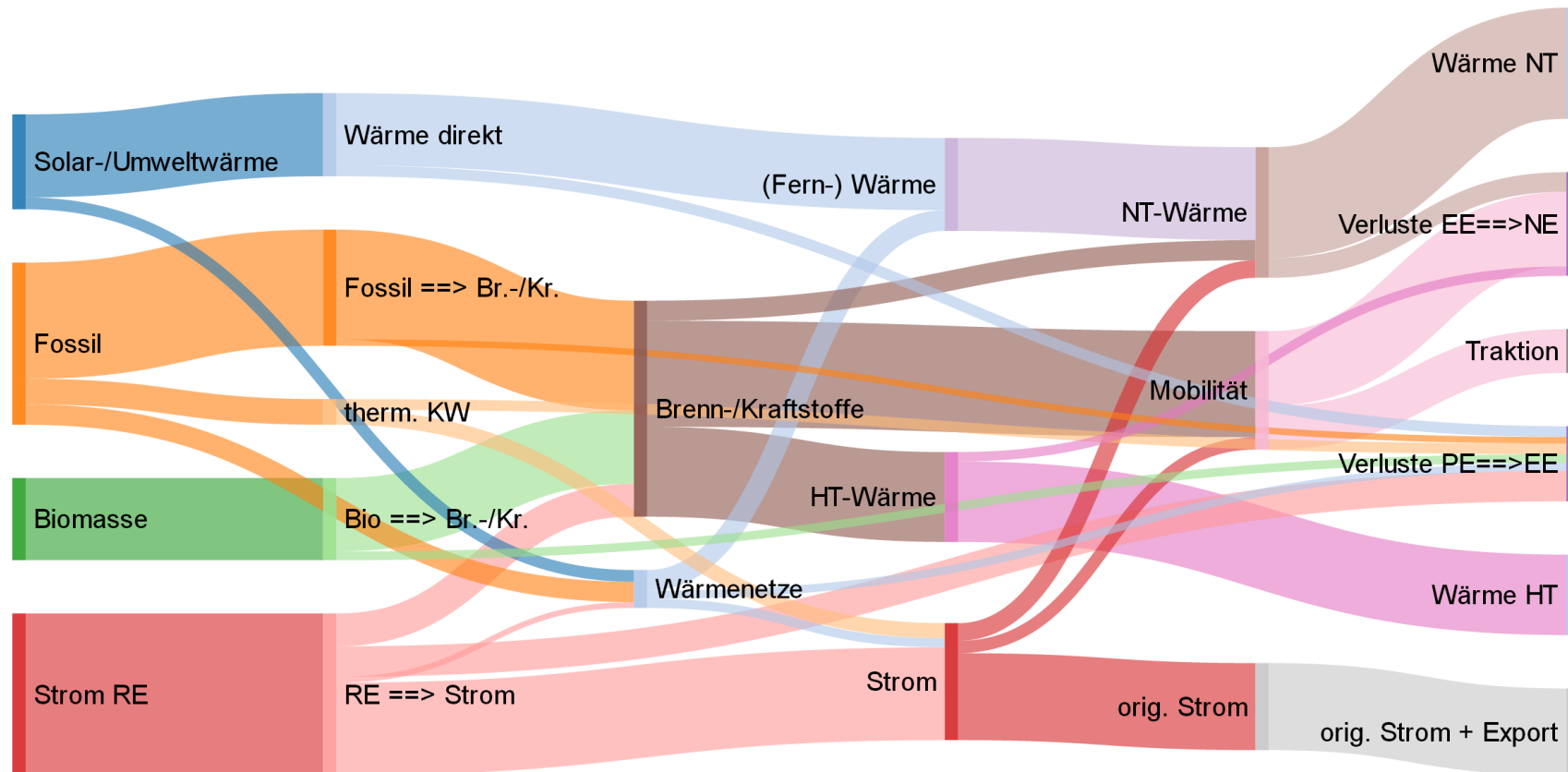
Profile können noch besser auf „[www.energy-charts.info](https://energy-charts.info/charts/remod_power_profiles/chart.html?l=de&c=DE)“ (Reiter Szenarien) betrachtet werden.

Primary Energy Efficiency Today 40%



Eigene Darstellung basierend auf: BMWi: „Zahlen und Fakten. Energiedaten. Nationale und internationale Entwicklung – Überprüfungsdatum 2015-09-22“, Daten von Prof. Dr. Eberhard Jochem (IREES) und eigenen Abschätzungen

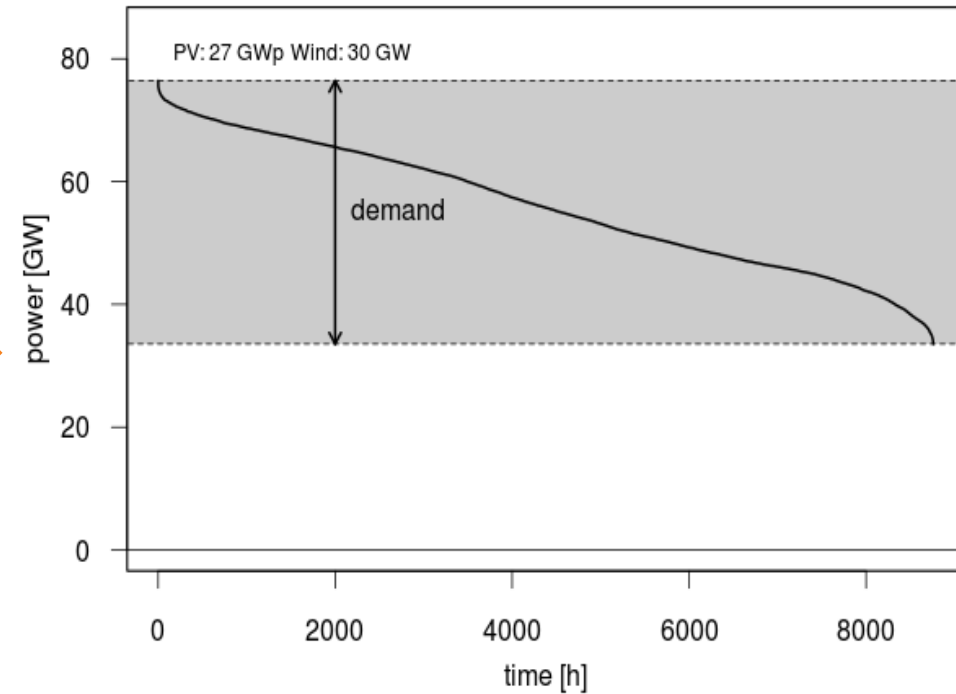
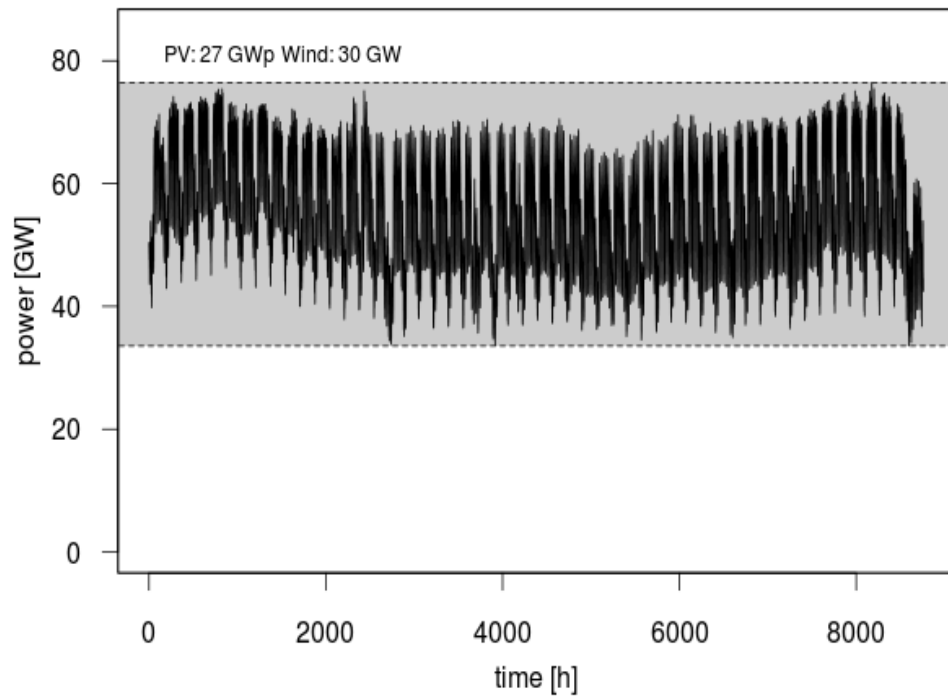
Primary Energy Efficiency 2030: 60%



Overall Efficiency=
Effective/
Primaryenergy=
60 %

Annual Duration Curve

Load Flow, LDC

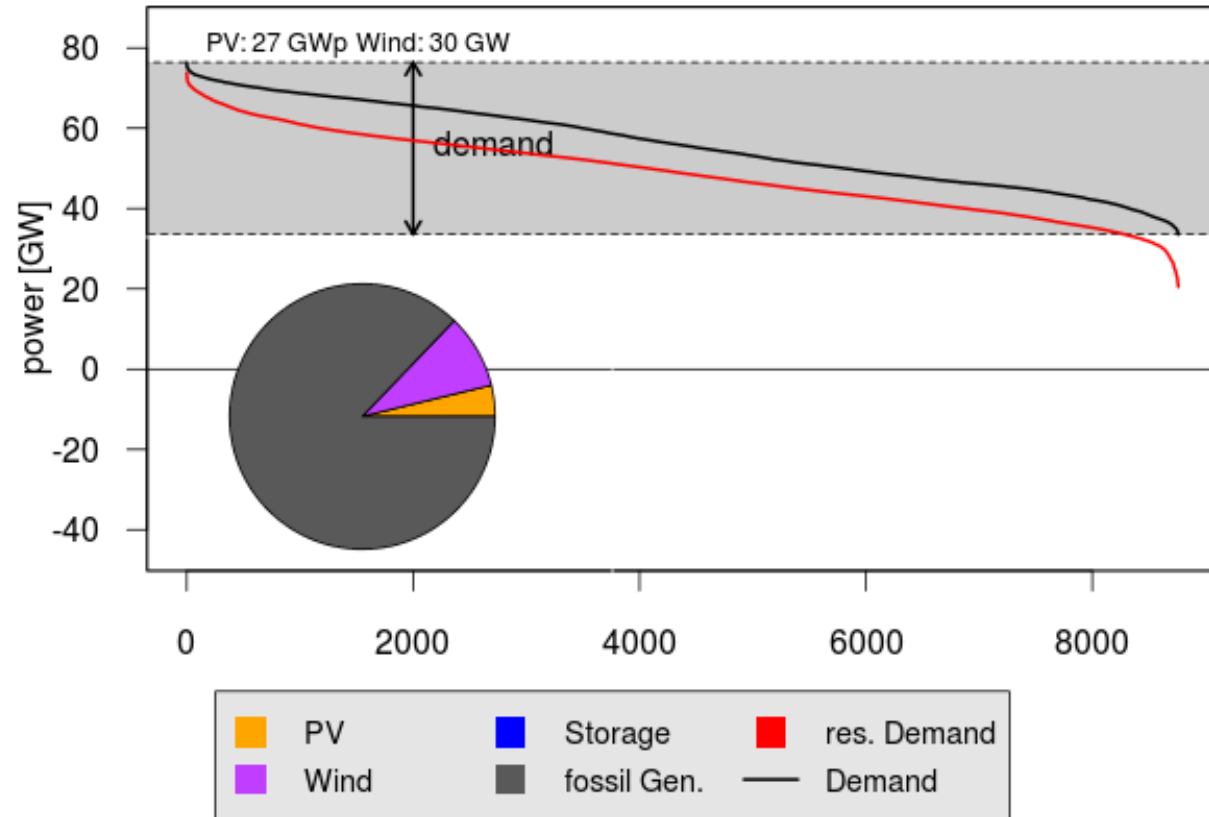


Residual Load 15% RES

Residual Load Definition:

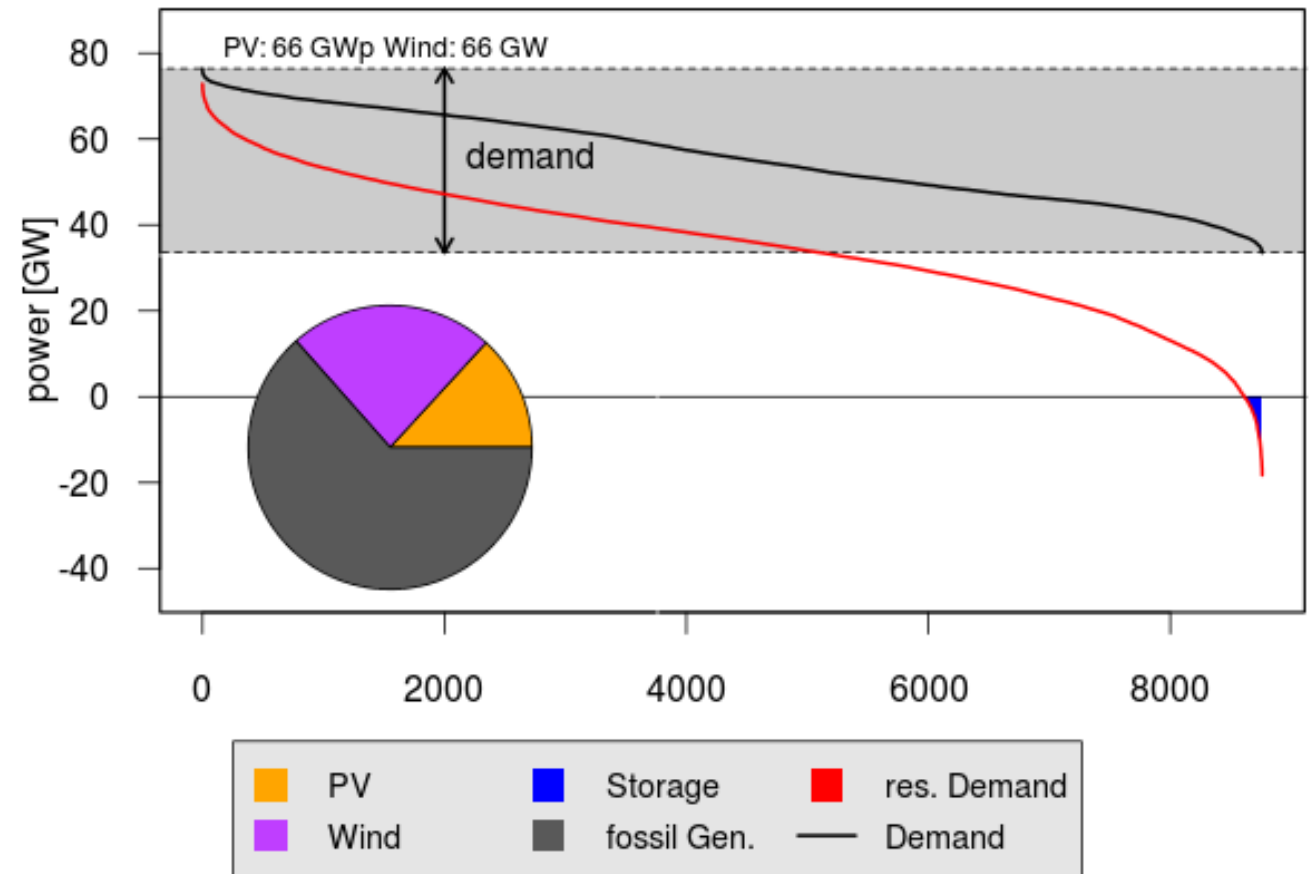
$$P_{res} = P_{load} - P_{PV} - P_{wind}$$

- RES reduces loads
- Scenario: 15% of demand is covered by RES (Wind and PV)
- Gradients of Production, e.g. Solar Eclipse



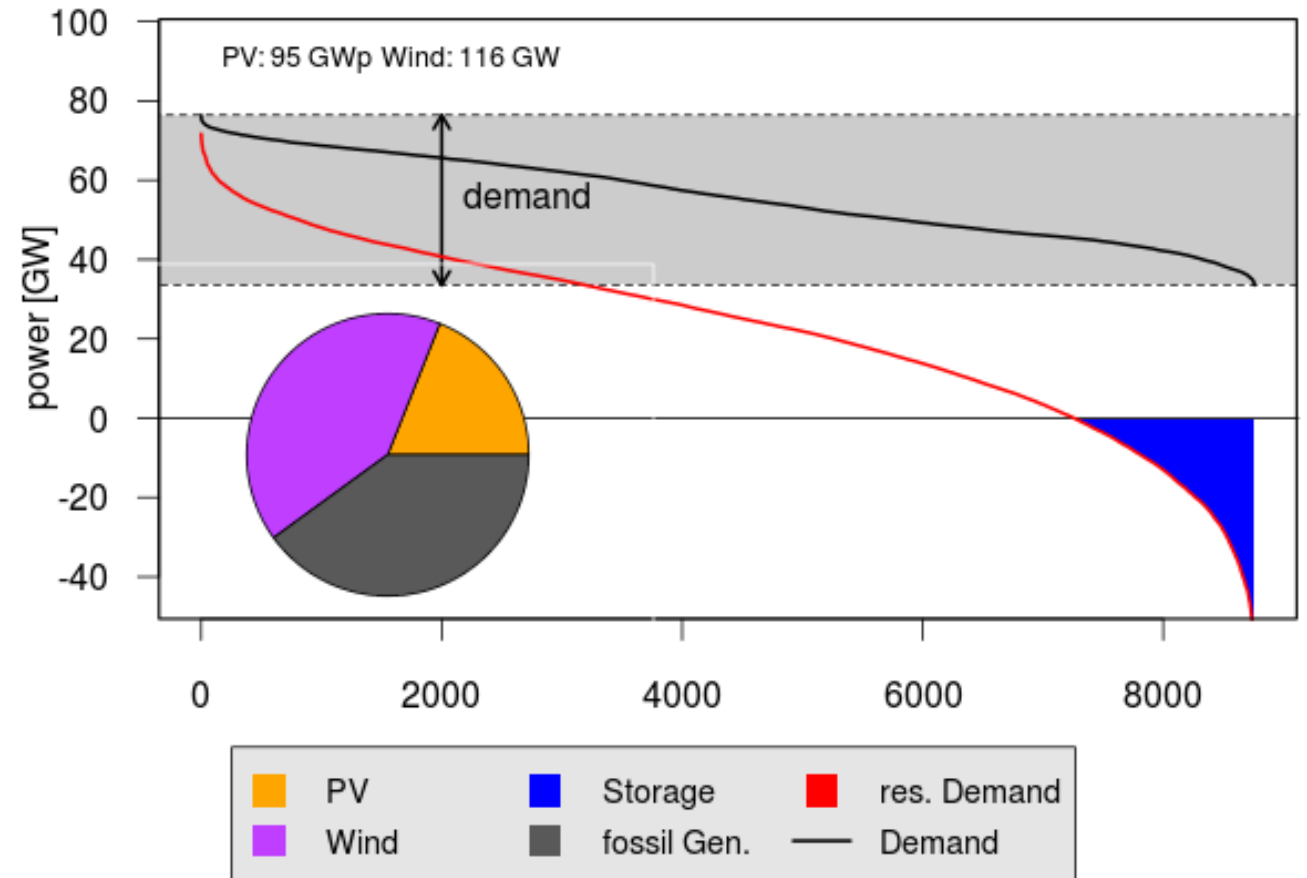
Residual Load 40% RES

- Scenario: 40% of demand is covered by RES (Wind and PV)
- Negative residual load appears
- Storage gets relevant



Residual Load 60% RES

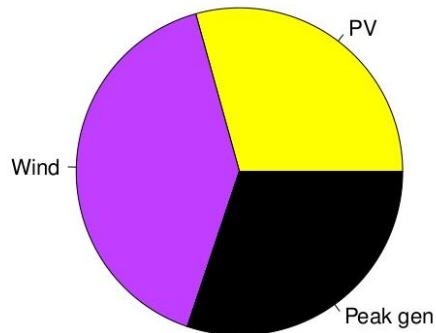
- Scenario: 60% of demand is covered by RES (Wind and PV)
- Extensive negative residual load
- Storage needed



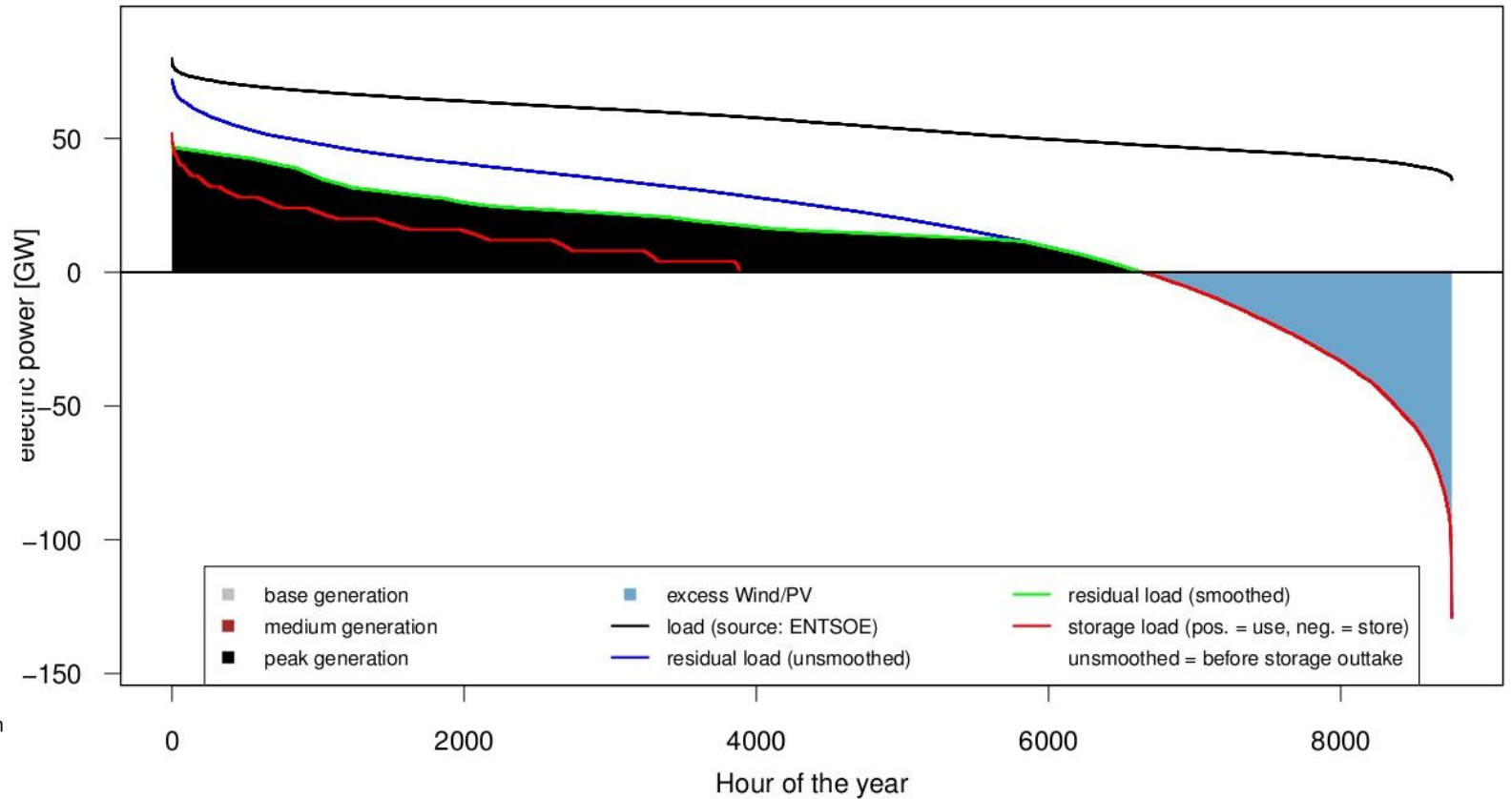
German Residual Load Curves

- Scenario: 2050 ISE

- base gen. = 0 %
- medium gen. = 0 %
- peak gen. = 30.2 %
- PV gen. = 29.3 %
- Wind gen. = 40.5 %

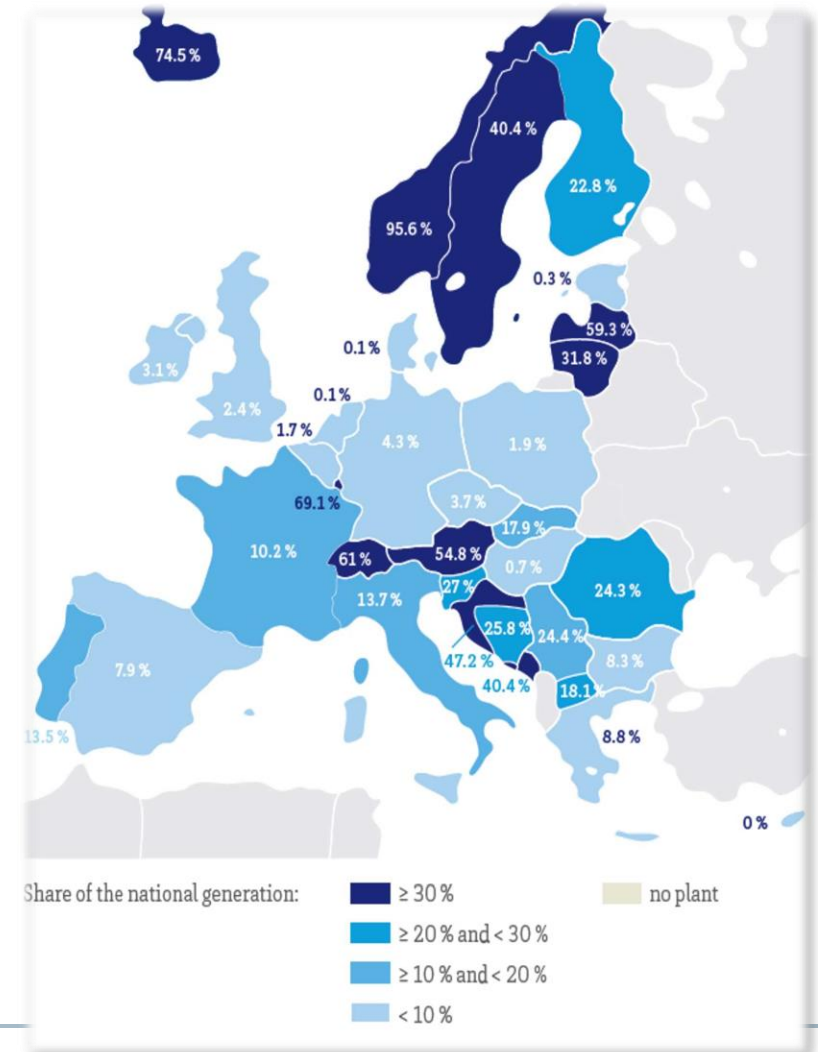
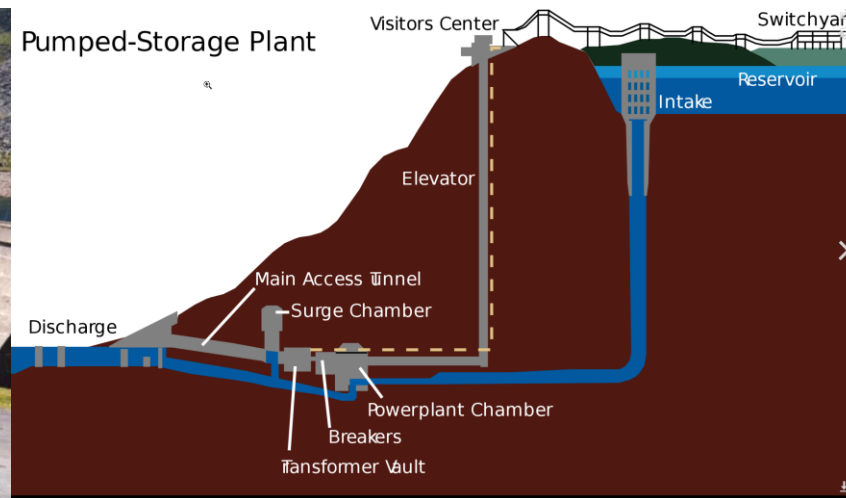


duration curves 2050: 'Load', 'Residual Load (unsmoothed & smoothed)', 'Storage Load'



Wasserkraft in Europa Übertragungsnetze

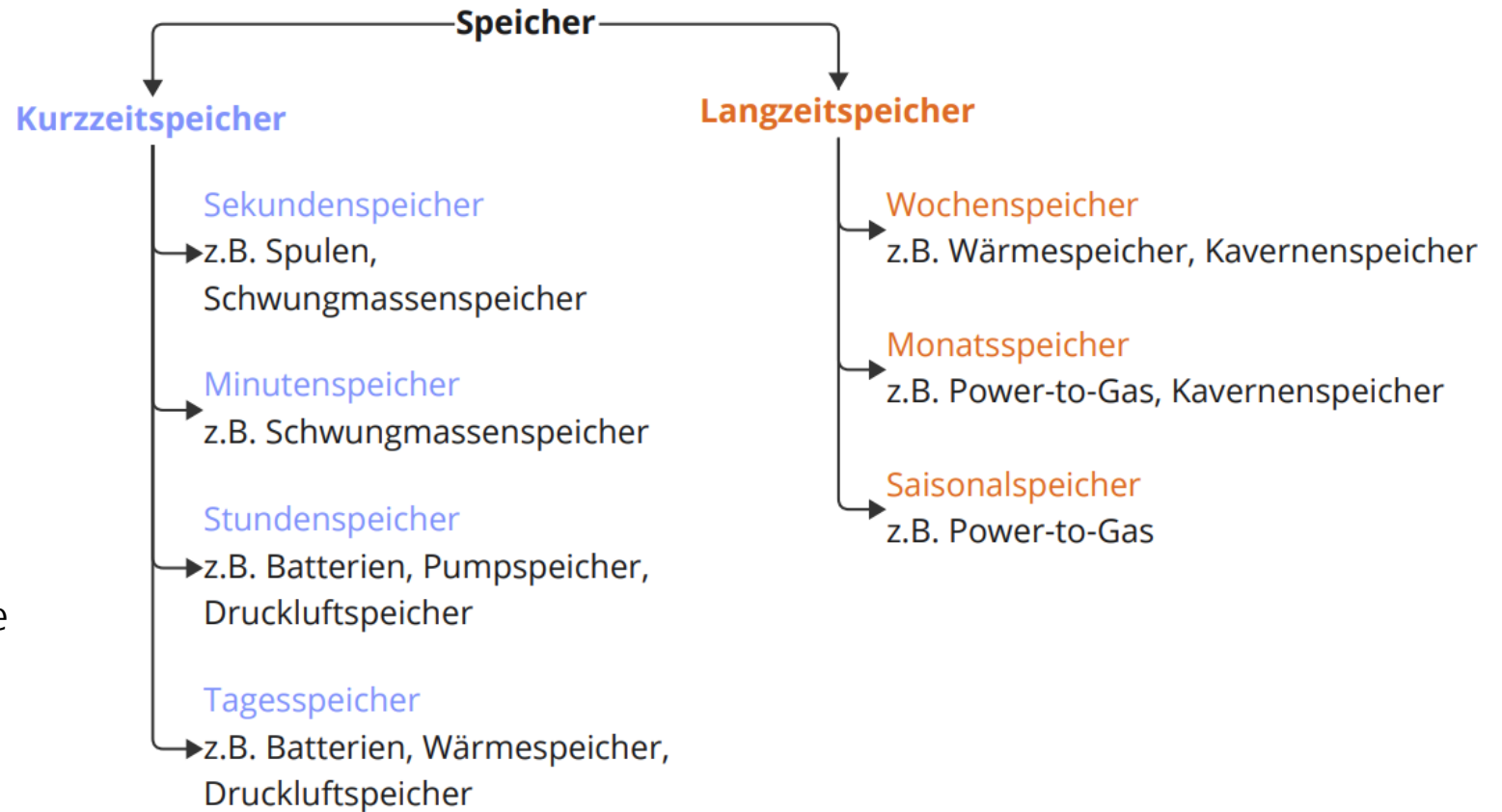
- National Specific Grid Supply Situation: Hydro Power
- Alpine regions and Scandinavian countries mostly powered by hydro
- Pumped storage and hydro power
- Switzerland 61% hydro; Norway 95% (in 2017)



Speicherarten

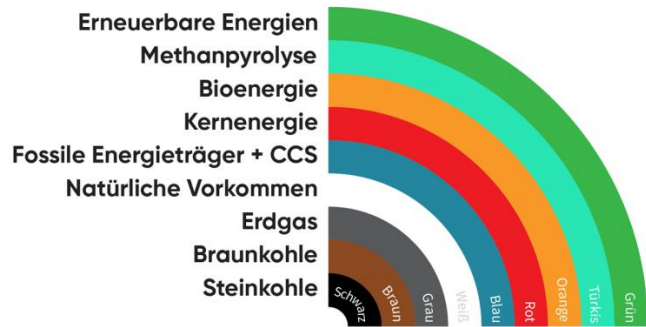
Speicher für EE

- Biogasanlage, Methangas
- Batterien
- Redox Batterie; Wochenspeicher
- Power2Gas: Elektrolyse
- Saisonale Speicher vgl Dänemark,
- Thermische Speicher: Eis/Wasser
- Druckluft in. Kavernen
- Schwungrad, Supraleitung Spule

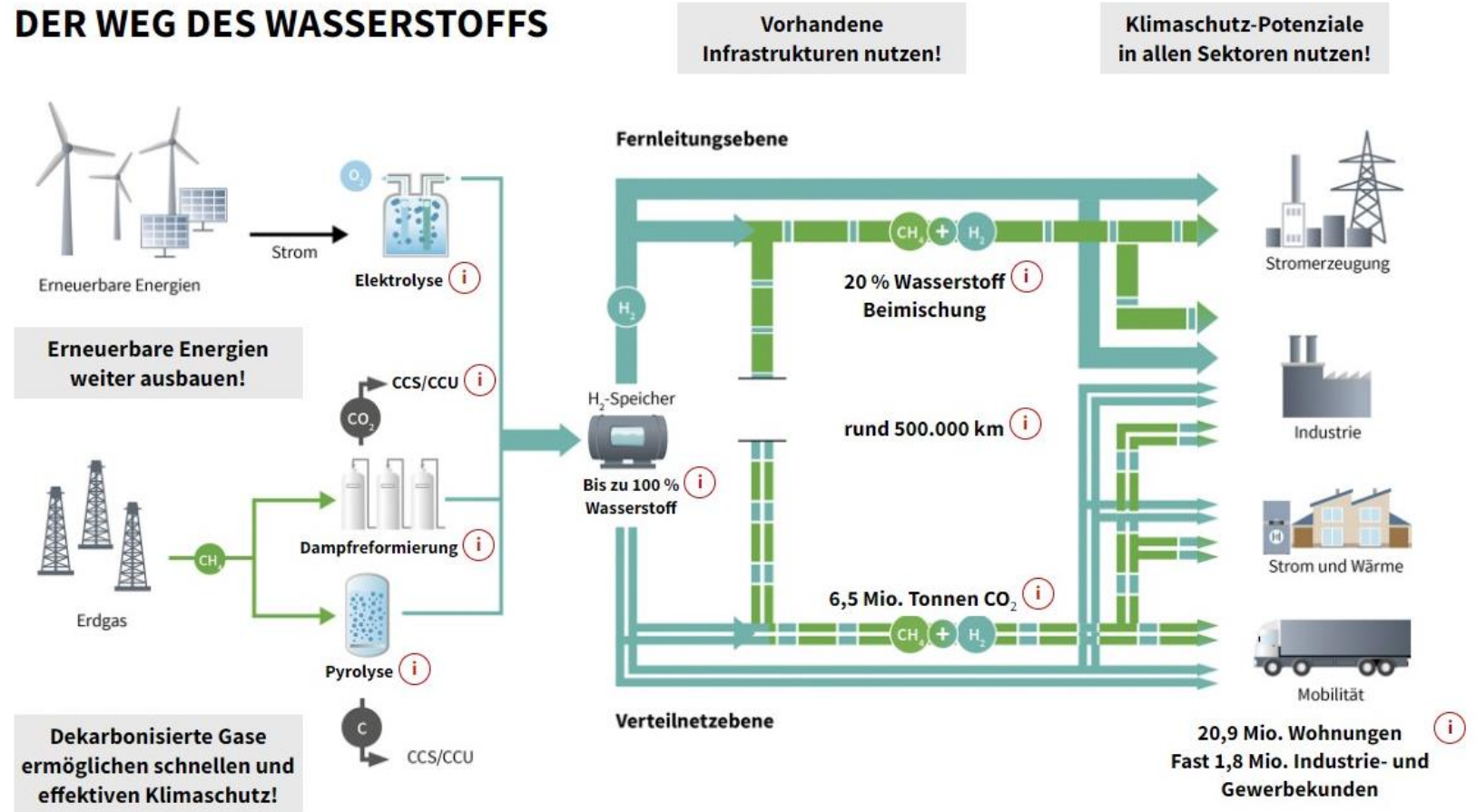


Speicherarten Wasserstoff

- Erneuerbarer Wasserstoff

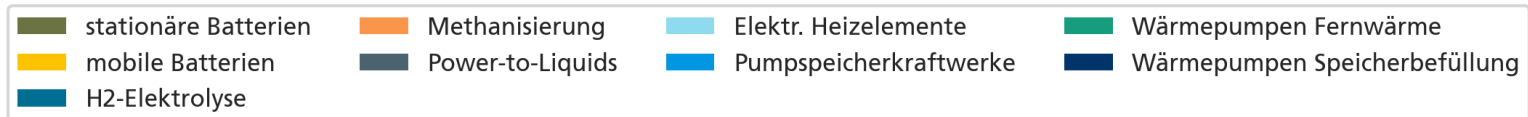
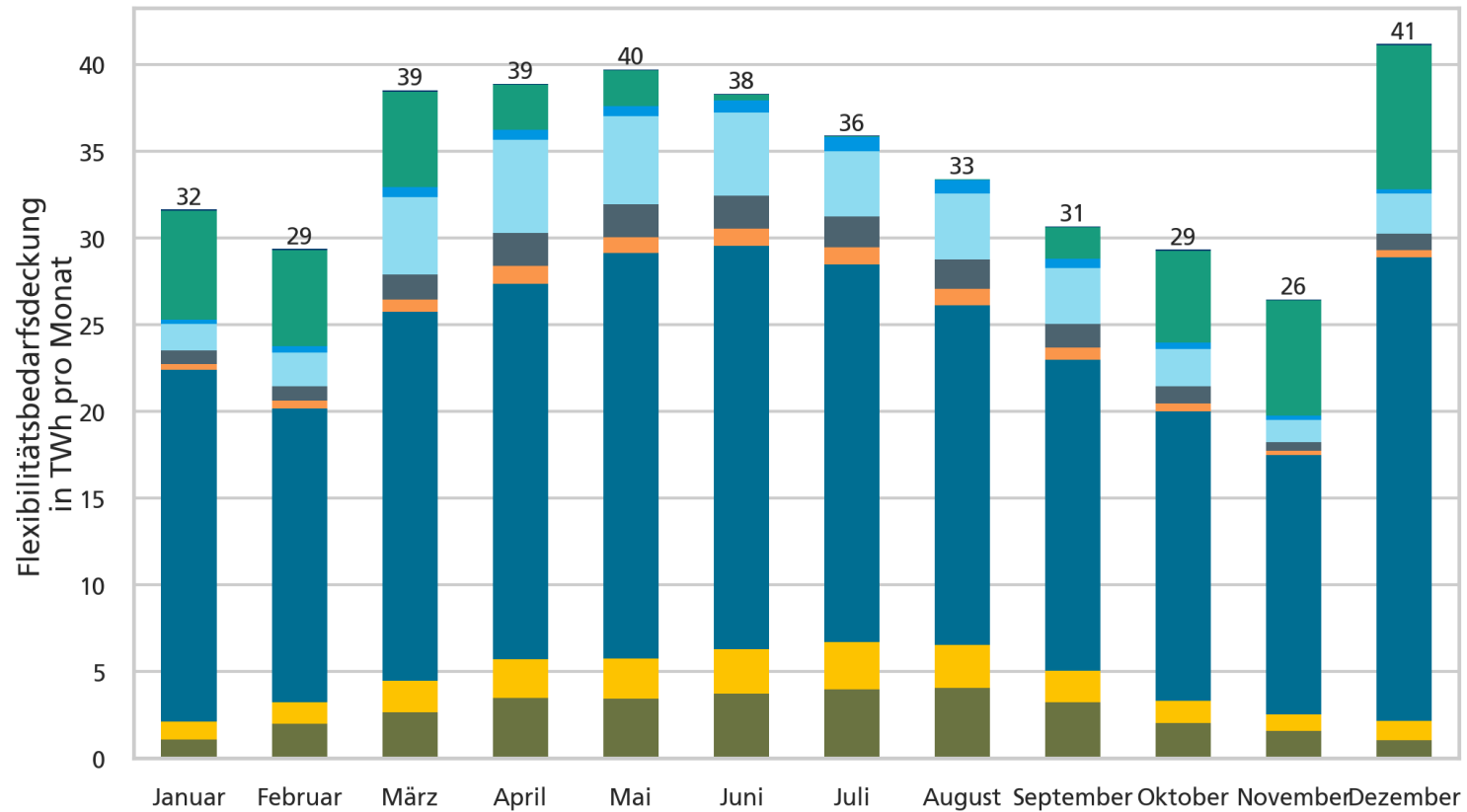


DER WEG DES WASSERSTOFFS



<https://www.erneuerbare-energien-hamburg.de/> IKEM

Flexibilität und Speicher zum Ausgleich für Erneuerbaren Energien



Energiesystemanalyse – Ergebnisse

Endenergie: Direkte vs. indirekte Elektrifizierung

- Starke Zunahme von Strom als Endenergie ist durchgängiges Ergebnis aller Szenarien und Systemstudien
- Unterschiedliche Ergebnisse bezüglich der Nutzung stofflicher Energieträger vor allem bei Schwerlastverkehr und Prozesswärme in der Industrie

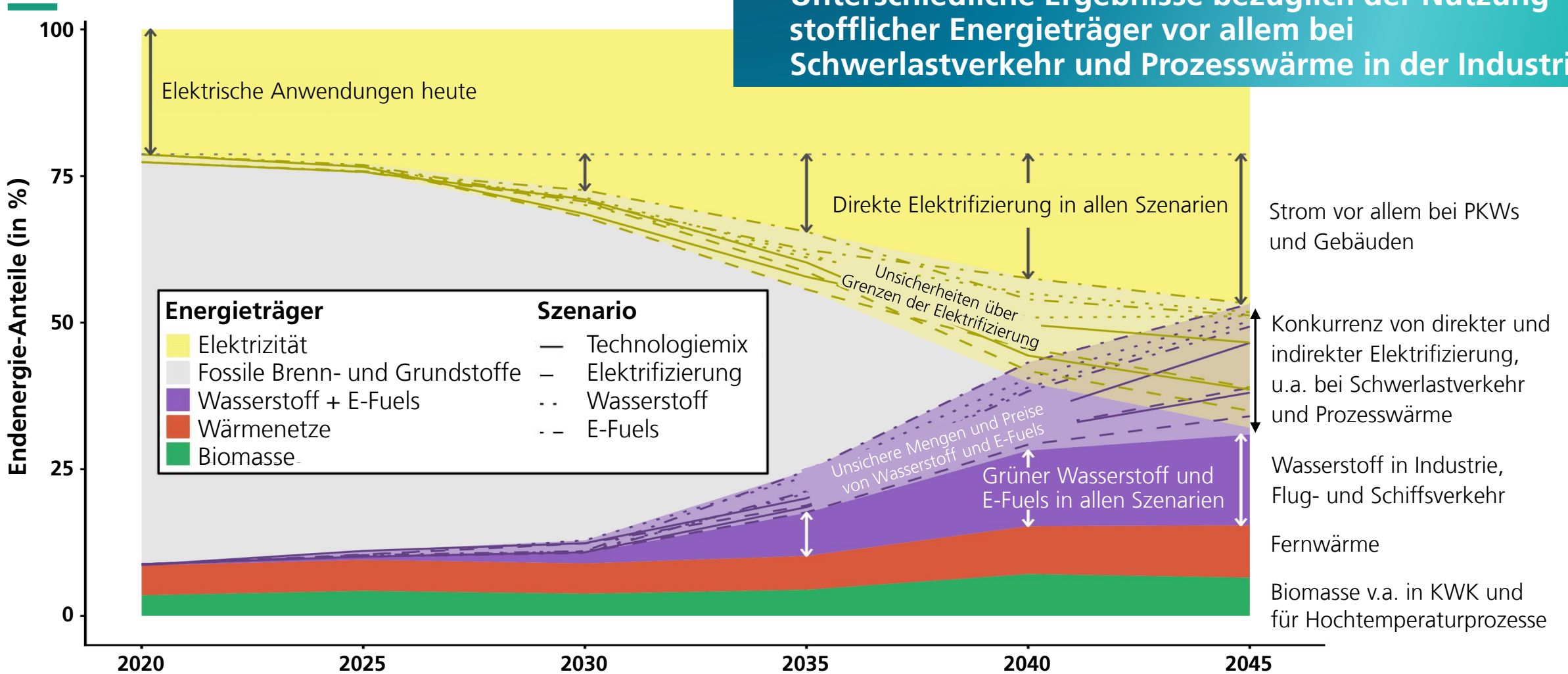
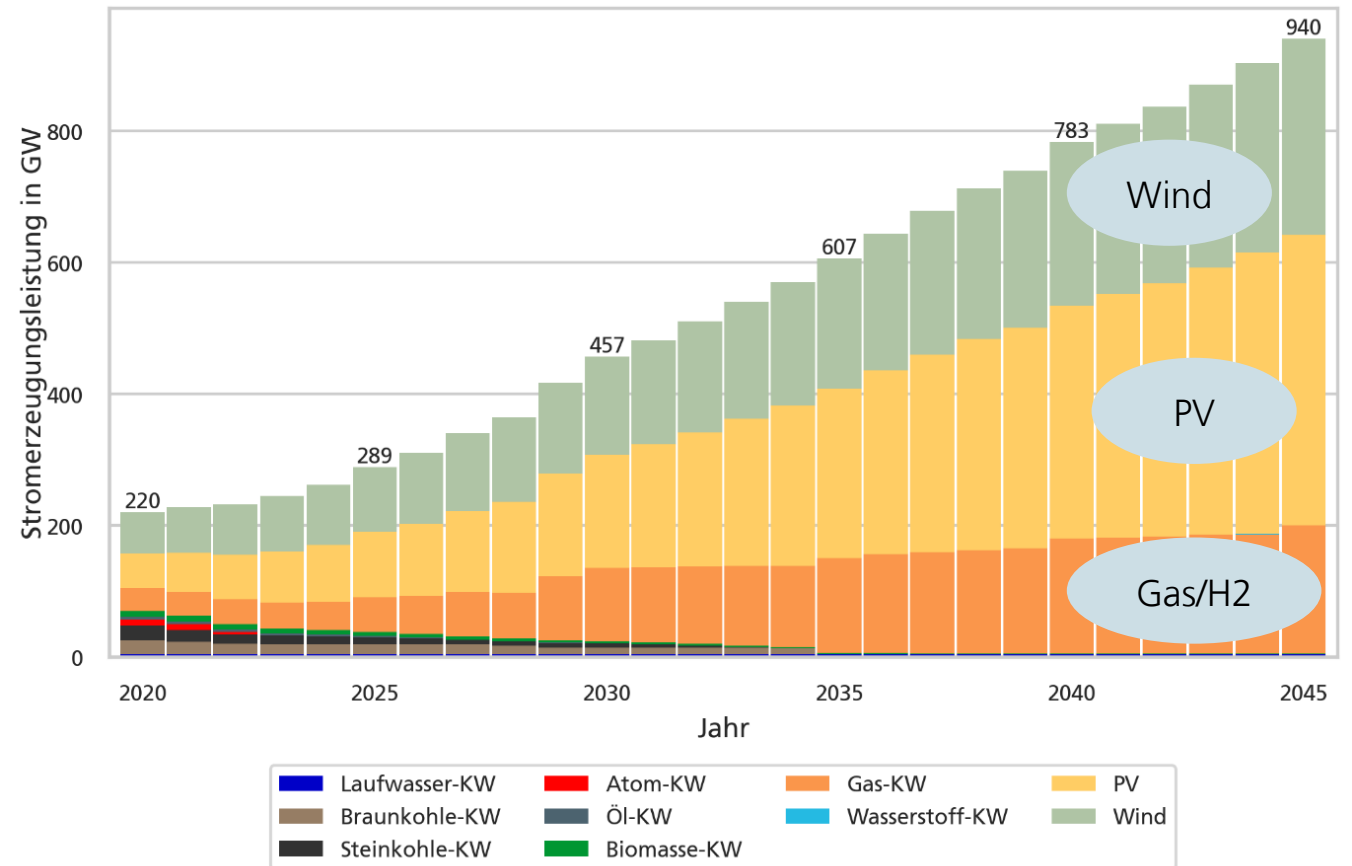


Abbildung: Ariadne Kurzdossier 2021: Durchstarten trotz Unsicherheit, 16.11.2021, <https://ariadneprojekt.de/publikation/eckpunkte-einer-anpassungsfaehigen-wasserstoffstrategie/>

Ausbaupfad

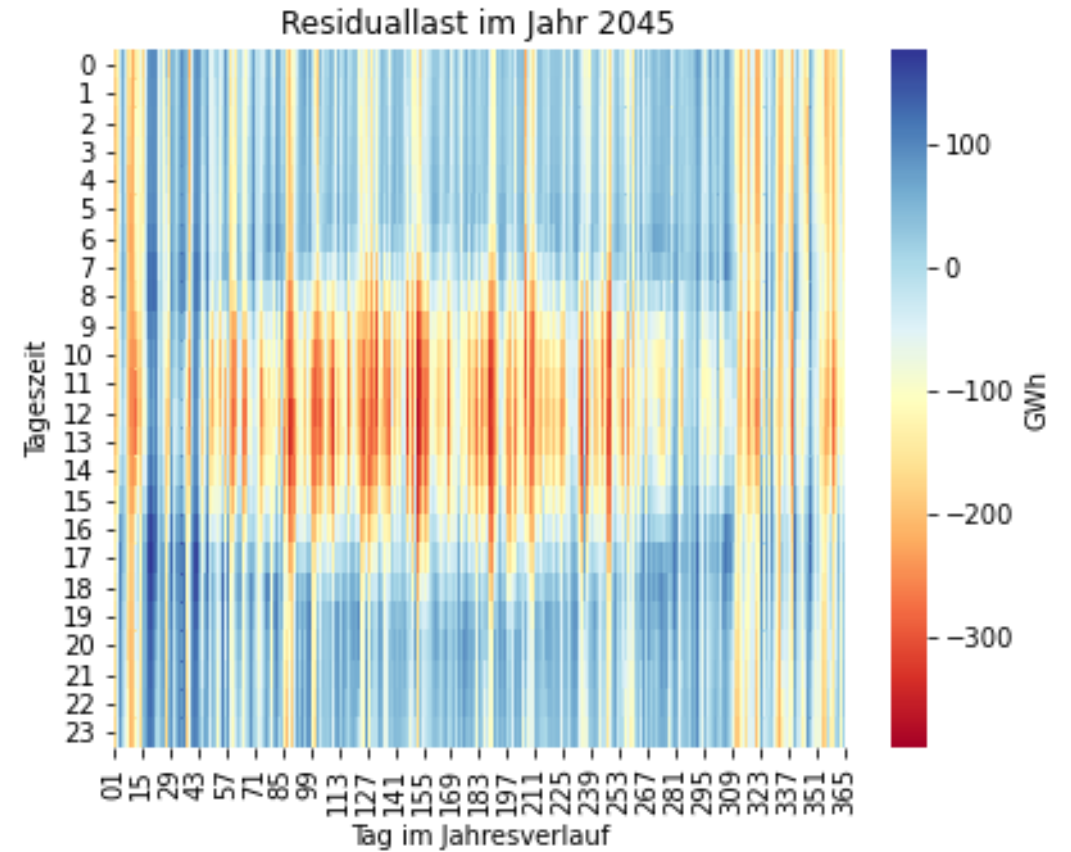
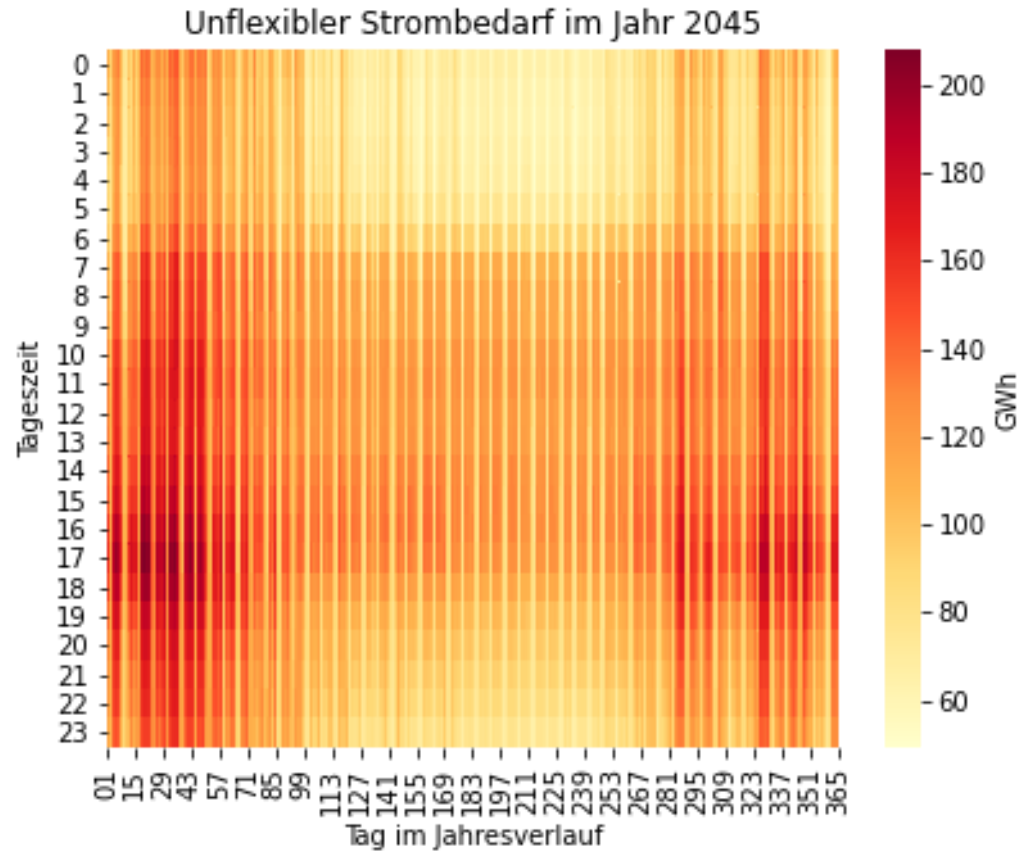
Berechneter Erneuerbaren Zubau zu Erreichung der Klimaneutralität 2045

- Transformationsstudien von zahlreichen Instituten bestätigt
- Wind, PV, Backup-Kraftwerk H2
- Leistung steigt dramatisch -> Netzausbau unerlässlich
- Flexibilitätsmanagement essentiell



Lastsituation im Jahr 2045

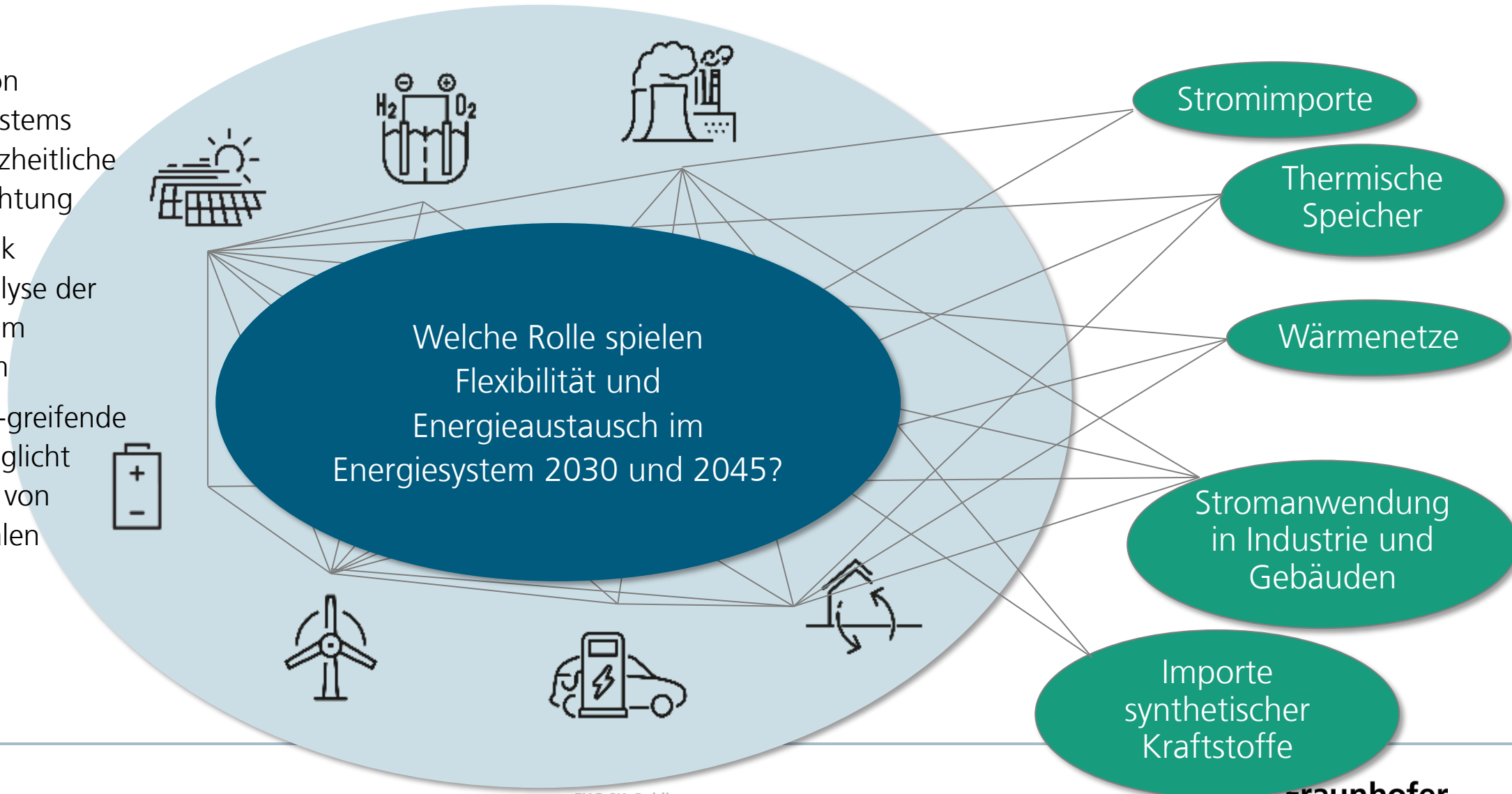
Strombedarf und Residuallast: Wind und PV ergänzen sich gut



Sektorenintegration mit Hilfe von Digitalisierung/Smart Grids

Welche Rolle spielt Flexibilität und Energieaustausch ?

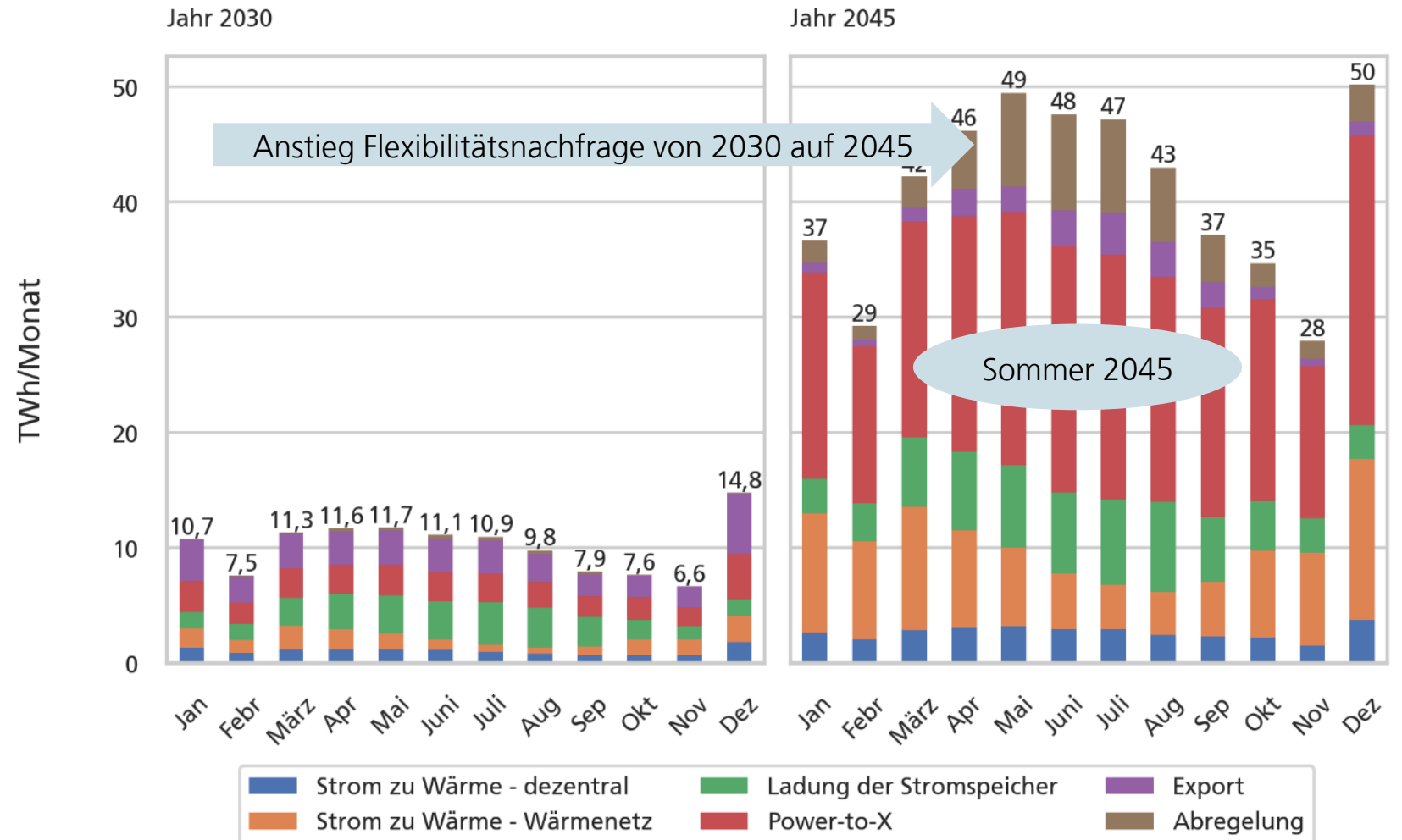
- Transformation des Energiesystems erfordert ganzheitliche Systembetrachtung
- Hohe Dynamik erfordert Analyse der Flexibilitäten im Energiesystem
- Sektorenübergreifende Analyse ermöglicht Identifikation von kostenoptimalen Pfaden



Sektorenintegration mit Smart Grids

Monatlicher Flexibilitätseinsatz zur **Stromaufnahme** 2030 vs. 2045

- Stromspeicher besonders im Sommer wirksam
- Wärmespeicher, Strom zu Wärme
- Hohe Relevanz von Elektrolyse P2X
- Abregelung bei hohen Überschüssen

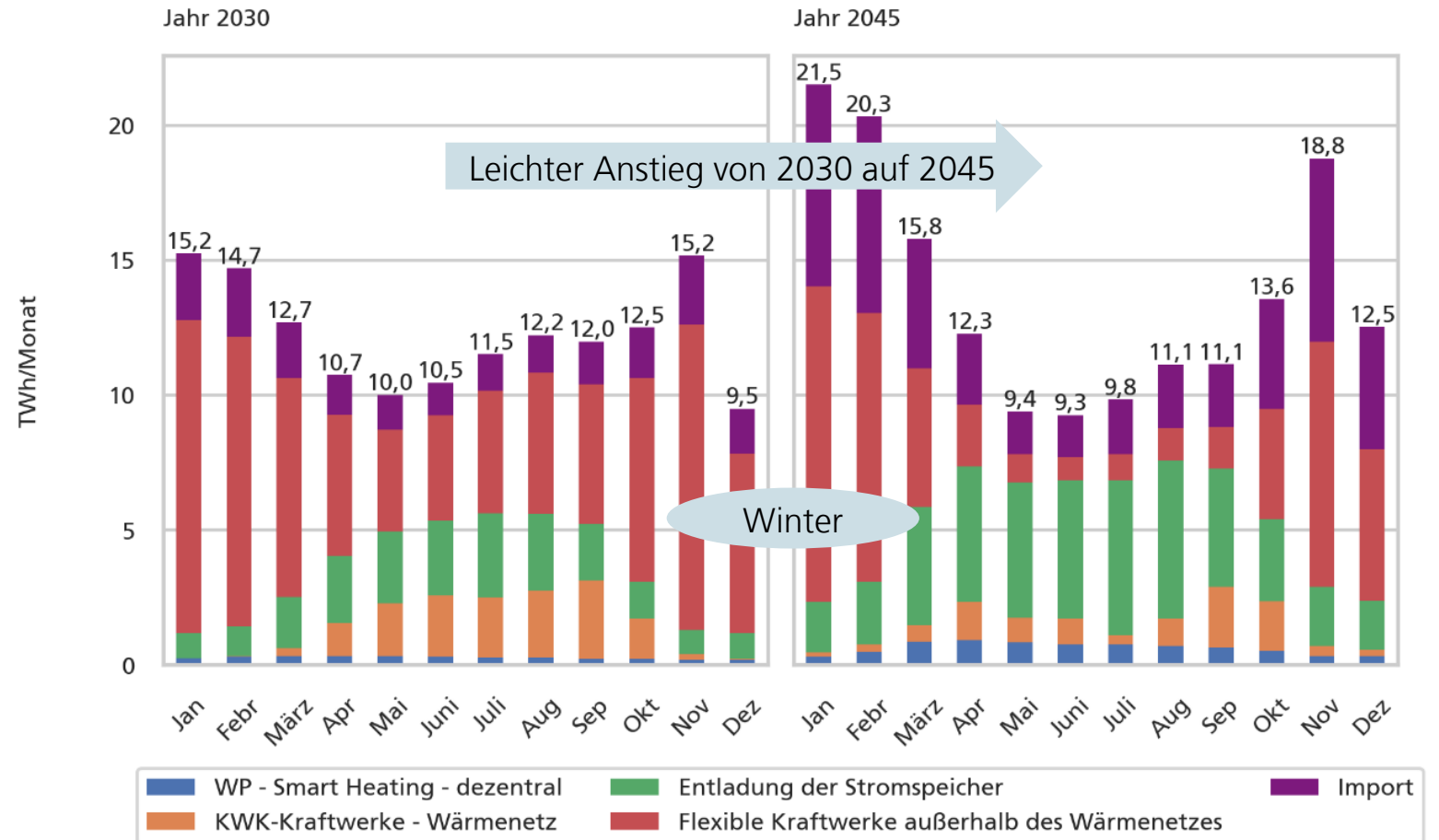


Sektorenintegration mit Smart Grids

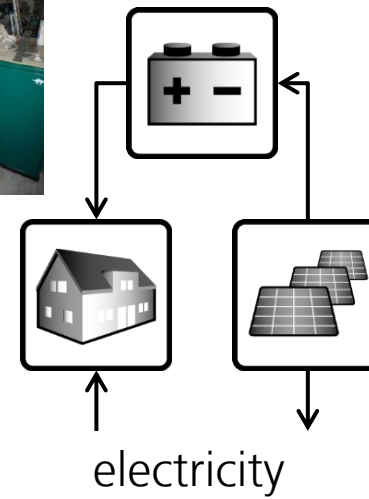
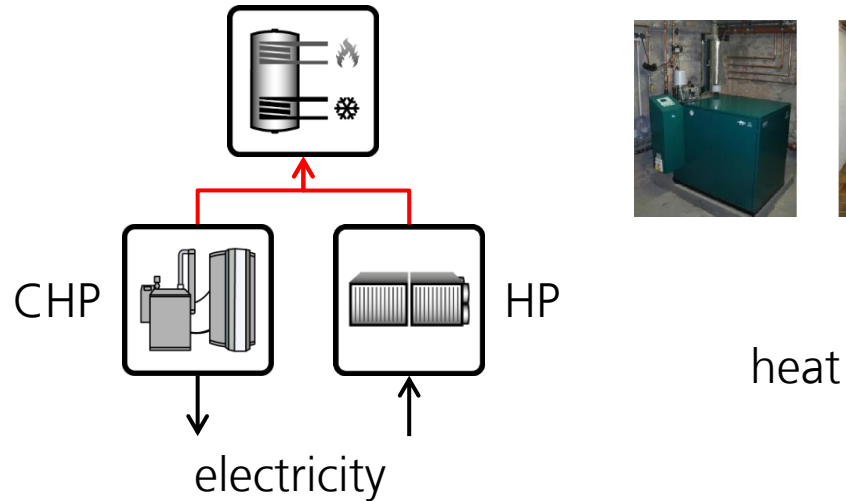
Monatlicher Flexibilitätseinsatz zur Strombereitstellung 2030 vs. 2045

- Flexible Kraftwerke
- Stromimporte aus dem Ausland
- Stromspeicher (vor allem Sommer, PV)
- Smart Heating durch Lastverschiebung von Wärmepumpen

-> Smart Grids ermöglichen den flexiblen Einsatz der Betriebsmittel und der Lastflußsteuerung im Netz



Decentralized generation and storage



<https://www.electrive.net>

Thermal Storage: CoGen (CHP) and Heatpump

- Thermal storages offer the possibility to decouple thermal and electric consumption
- Highest Efficiency for primary energy use
- Low Cost Storage as a water tank (1 kWh/Km³)
- From heat driven CHP to electricity demand driven operation
- Flexible production: demand side management and flex tarif;

PV-Battery Systems

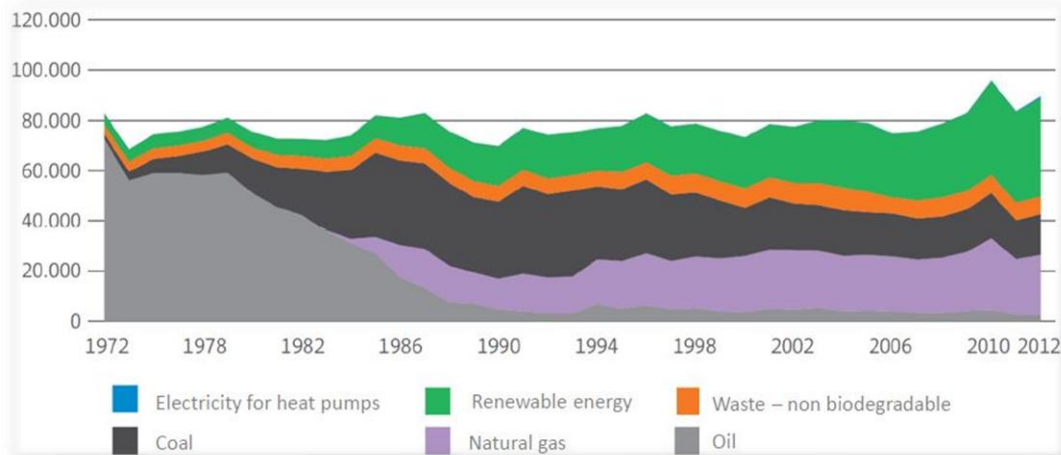
- Highest Efficiency for electric storage
- Self consumption operation strategy already a business model
- LCOE for PV-Bat Systems: 7-14 Cent/kWh in 2021, strong decrease
- Grid services, ancillary services for grid support (voltage control)
- V2G Vehicle to Grid allows bidirectional integration of huge storage capacity

Decentralized generation and storage

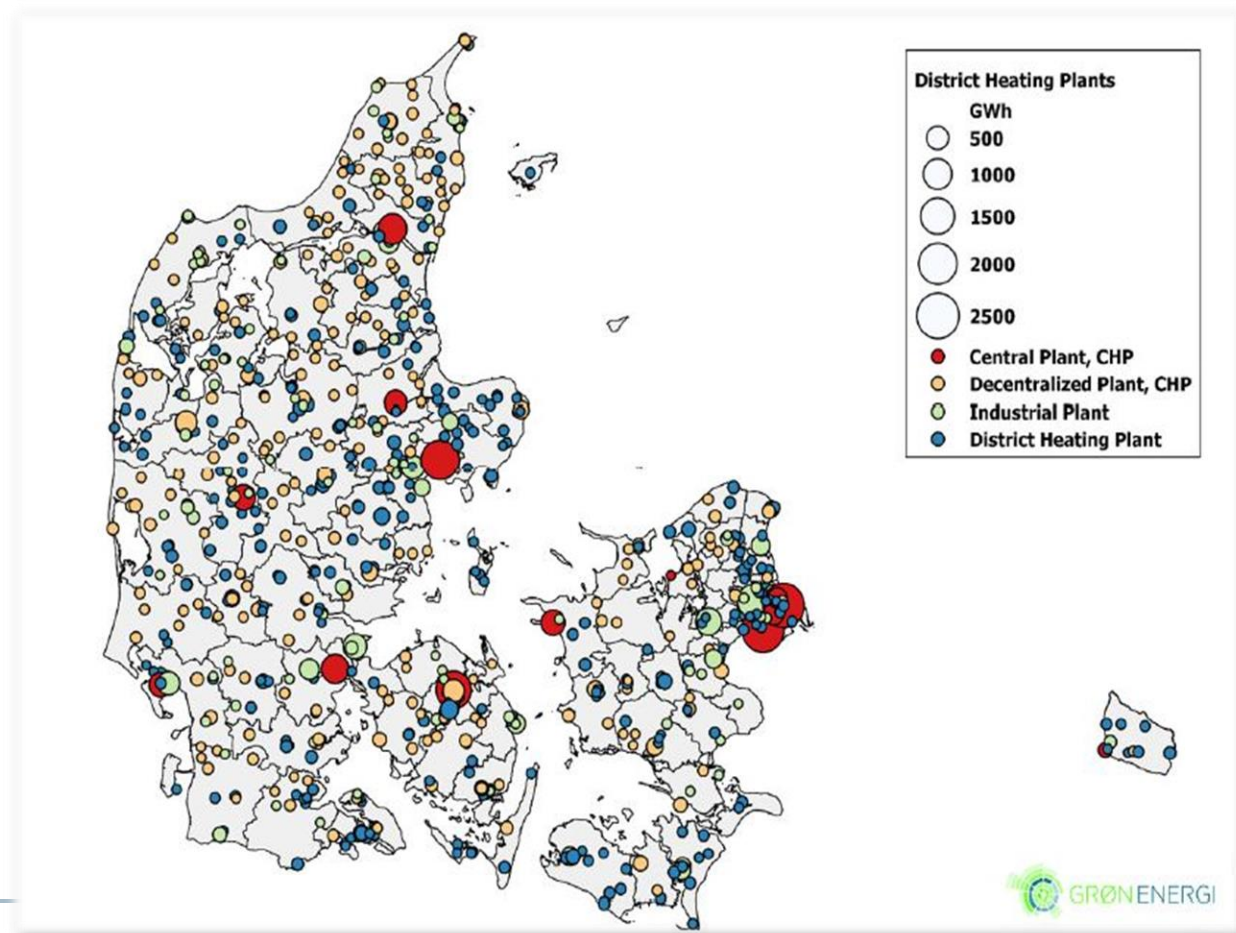
District Heating in Denmark

- More than 460 plants and units generate district heating
- 60.000 km district heating transmission and distribution grid
- 64% of all homes uses district heating.
- Coal, biomass (straw, woodchips and pellets), natural gas, municipality waste, thermal solar and biogas.

District Heating – From oil to multiple fuels



Change in fuel used for district heating generation 1972 – 2012 (PJ)



PV-Battery Systems

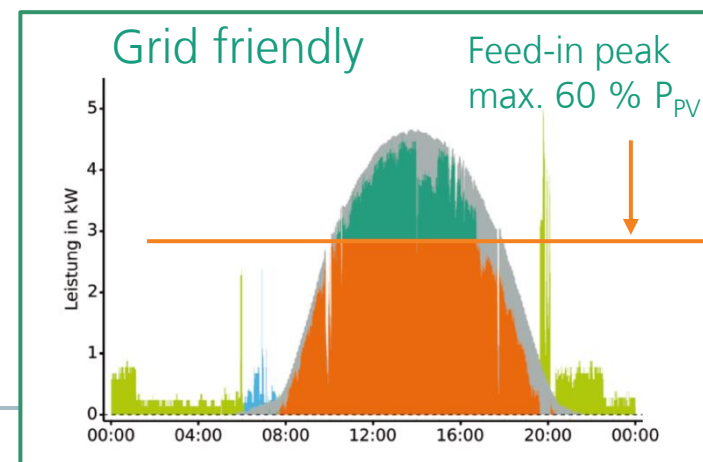
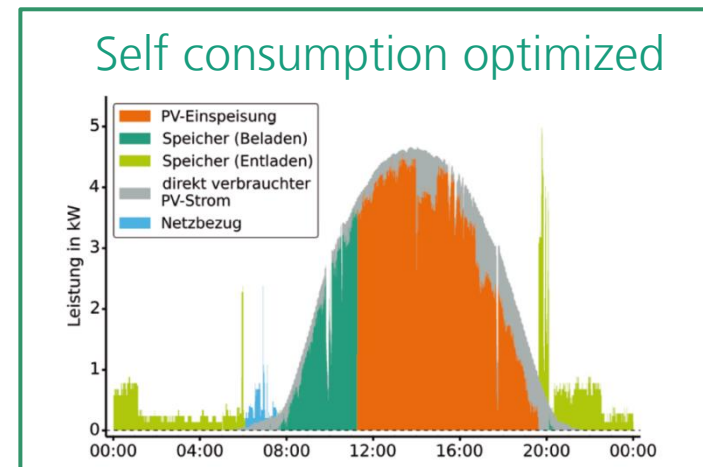
Grid-friendly operation of PV battery systems, Status quo vs grid friendly operation

Status quo of PV-Battery Systems:

- Solar production with peak at noon, battery for covering the evening
- Typical sizing: PV 1 kWp, Battery: 0,5..1 kWh
- Self Consumption prioritized, „charge the battery as fast as possible“
- Battery is discharged, if demand greater than generation
- Economic optimization for the owner of the system, not for the grid at all
- Maximum peak for solar is not reduced

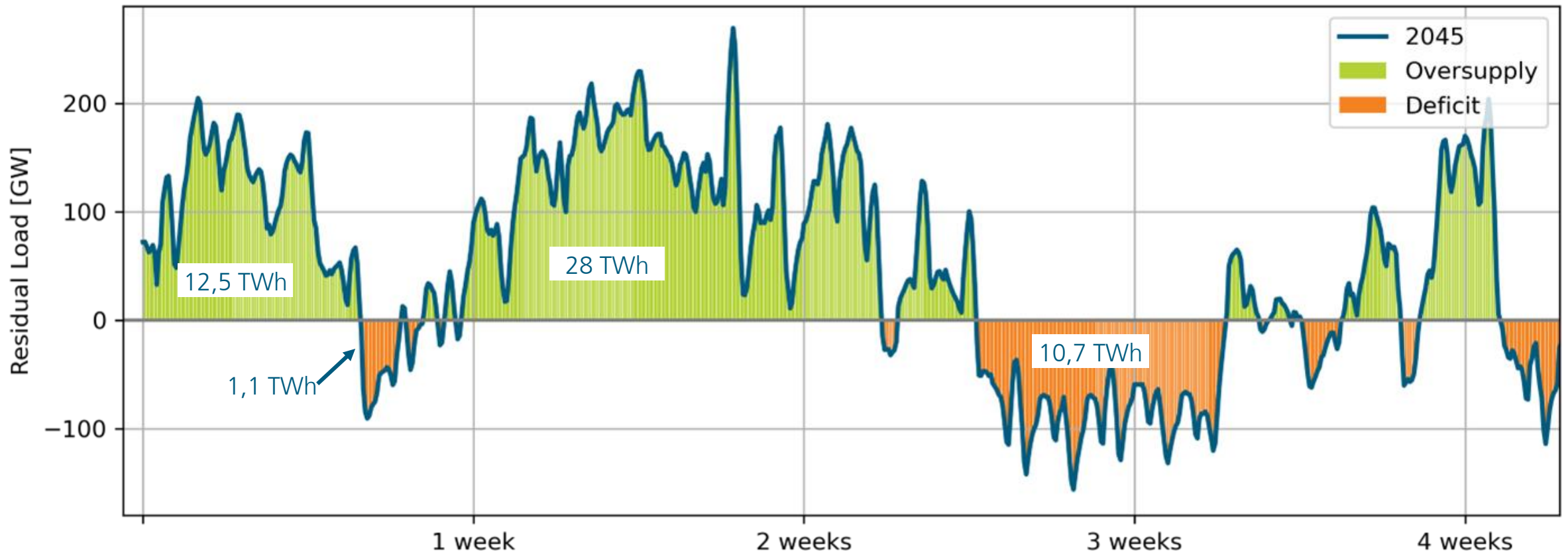
Grid friendly operation of PV-Battery Systems:

- „Peak shaving“ of solar feed in power, limitation typically 50,60,70% of P_{max}
- Storage management: Limited feed in power
- Voltage reduction
- Grid friendly operation: up to 66 % surplus PV can be installed



Residual Load Analysis

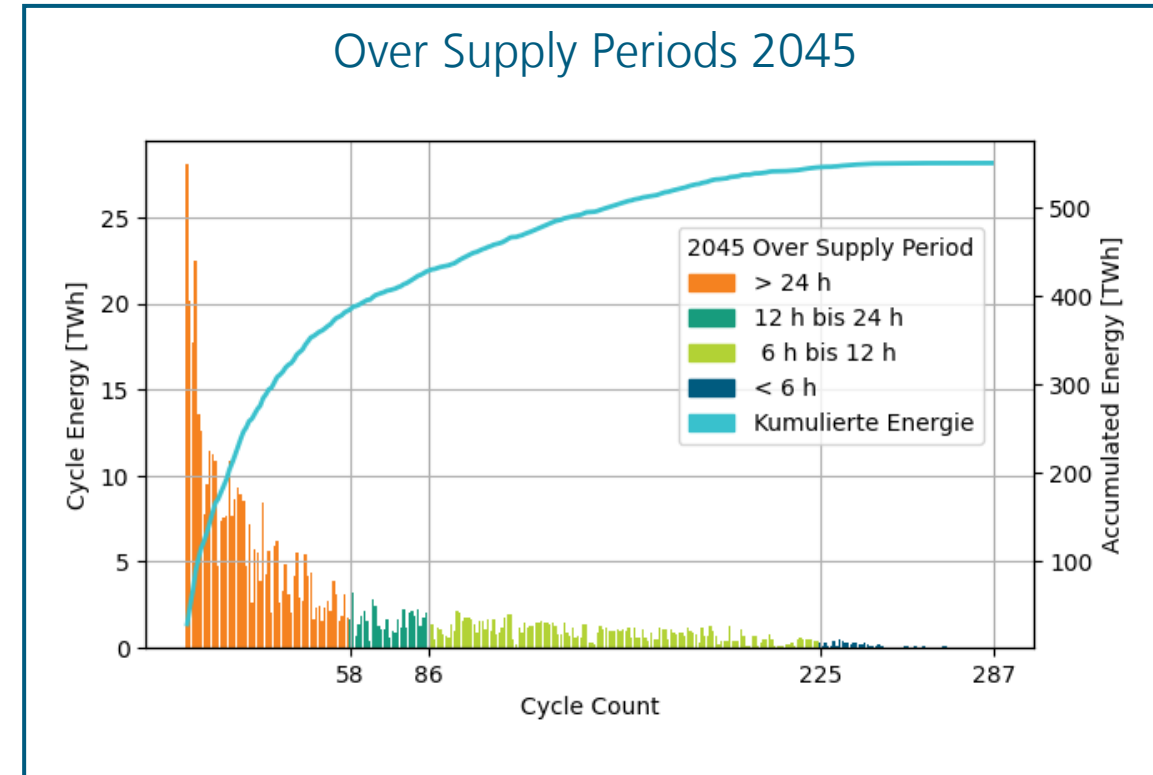
Period Identification Method



Residual Load = volatile generation – non controllable load

Summary


	2030	2045
Cycles per Year		~300
Largest Overshoot Period	8 TWh	28 TWh
Largest Deficit Period	7 TWh	11 TWh
# of overshoot periods > 24 h	30	58
# of deficit periods > 24 h	11	17



▶ Surplus periods longer and larger than deficit periods. Most of the cycles are suitable for batteries.

Geschäftsmodelle für die Batterie

Kombination des Betriebs



Business Case		Standalone	BESS + asset	Business behind-meter
Local Systems	Self Consumption			Orange
	Peak Shaving			Orange
	Network Limitations			Orange
Grid Connection	Redispatch		Blue	
	Curtailment		Blue	
	Resource Optimization		Blue	
Arbitrage	Intraday Market	Blue		Orange
	Day Ahead Market	Blue		Orange
	Profile Service (Band)	Green		Orange
Frequency Containment Reserve	FCR	Light Blue	Light Blue	Light Orange
	aFRR	Light Blue	Light Blue	Light Orange
	mFRR	Light Blue	Light Blue	Light Orange
Grid Services	Grid Forming	Grey	Grey	Grey
	Black Start	Blue	Blue	Orange
	Reactive Power Delivery	Blue	Blue	Orange
	Congestion Services	Blue	Blue	Orange

Local Energy Management

- Only sensible with consumption integration

Grid Infrastructure

- Redispatch und curtailment: Storage Usage
- Resource Utilization: Needs storage

Energy Arbitrage:

- Commercial Storage: Take advantage of Time of Day pricing
- PV Combination is challenging, as the EEG does not allow energy from the grid
- No advantage from co-location (only resource utilization)

Frequency Containment

- In principle, must decide which capacity for which market.
- Small market, not very profitable in the future.

Grid Services

- Grid Forming: Specification of Requirements for Generators (RfG)
- Black-start: Local or municipal solution (previously bilateral contracts), future TSO tender
- Reactive power determined by inverter sizing

Problemstellung // Herausforderung:

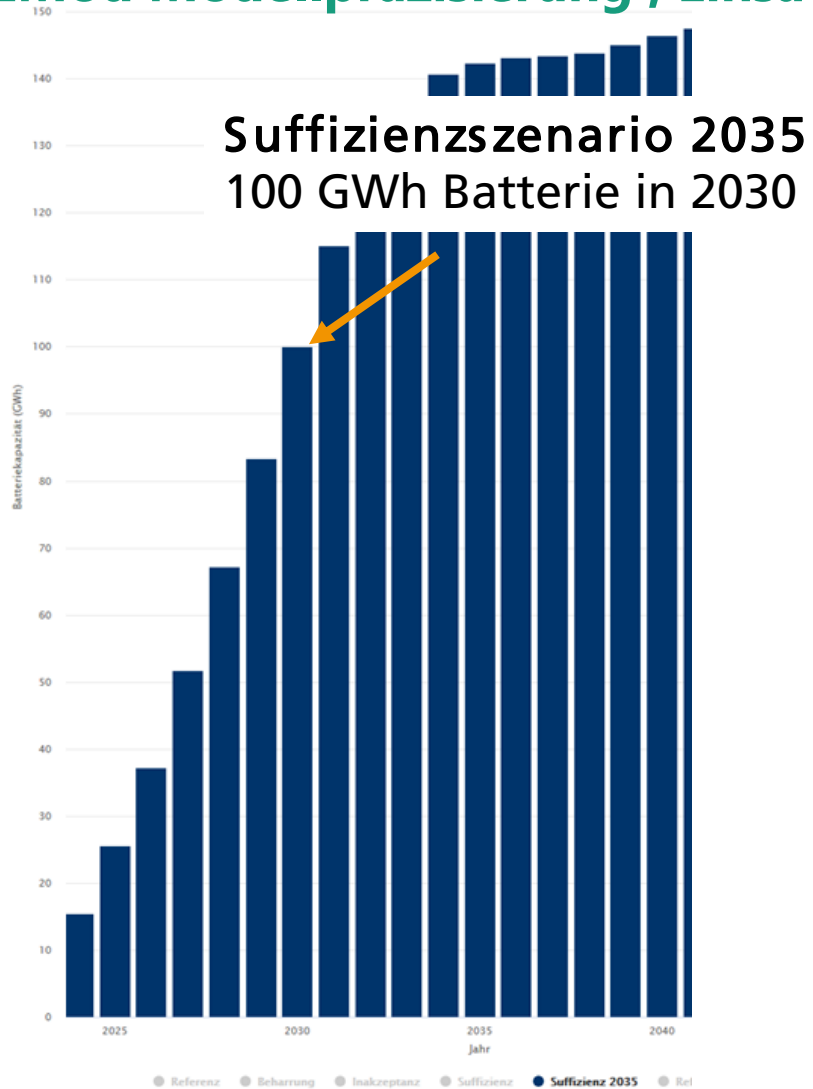
Zubaupfad und Beitrag von Batteriespeichern bei der Transformation des Stromnetzes

Datenaufbereitung für die Berücksichtigung ortsbezogener Speicheranlagen in REMod und für den Redispatch im Übertragungsnetz

- Schnelle Stromspeicher werden bisher im dt. Verbundnetz fast ausschließlich über Pumpwasserspeichern bedient
- Der Bedarf an Kurzzeitspeicher durch Zubau von PV wächst enorm. Bisher ca. 5 GW Rückspeisung an sonnigen Tagen bei 30 GW PV Einspeisung, d.h. bei 100 GW PV werden schon > 15 GW Speicher notwendig
- Bei Zubau von PV wird Bedarf ggf. proportional steigen, hinzu kommt die Netzüberlastung, die durch Batteriespeicher deutlich reduziert werden kann; Die Netzdienstleistung und die Resilienz im Netz werden derzeit zu wenig berücksichtigt.
- Batteriespeicheranlagen werden durch die Nachfrage in der Elektromobilität erheblich kostengünstiger, Erwartungswert <100 €/kWh
- Es gibt große Probleme durch den Netzausbau durch hohe Kosten und wenig Akzeptanz für Infrastrukturprojekte, ebenso gibt es verfügbare neue Standorte durch Kraftwerkrückbau mit hohen Anschlusskapazitäten
- PV und Batterie ergänzen sich von der Speichertiefe bestens, Wind und Wasserstoffspeicher sind das Pendant

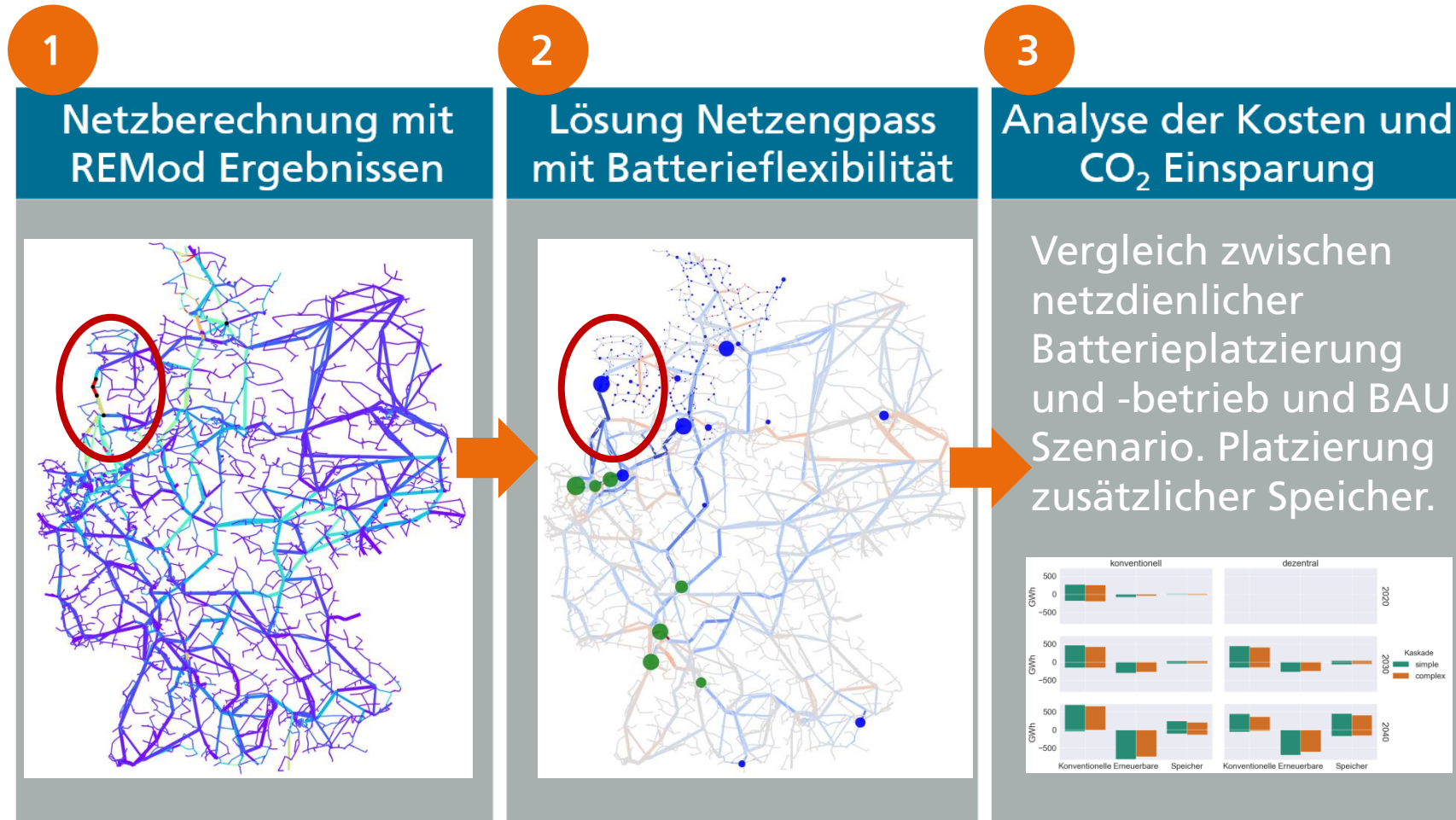
Mittelfristiger Zubau und Bedarf von Batteriespeicher bis 2030 (ESA)

REMod Modellpräzisierung , Einsatzfolge

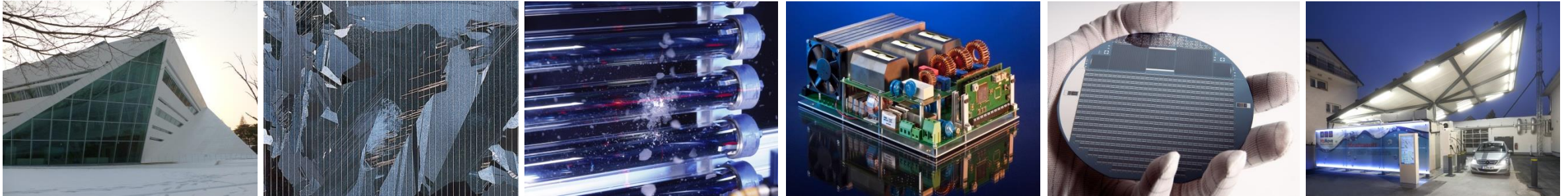


- Validierung Kraftwerkseinsatzplanung an EnergyCharts Daten
- Abgleich und Integration von EnergyCharts Daten
- Sensitivitätsanalyse mit REMod, Modifikation der Einsatzfolge entlang des Marktgeschehens
- Grobplatzierung von Batterien im reduzierten Übertragungsnetz (100 GW entspricht 120% Spitzenleistung im Netz heute)
- Disaggregation aller Ergebnisse auf Übertragungsnetzknotten

Netzanalyse zur Identifikation der örtlichen Verteilung von Batterien (INT) Redispatch/Einsatzpräzisierung mit Hilfe des Netzmodells in Pypsa



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Prof. Dr.-Ing. Christof Wittwer

www.ise.fraunhofer.de