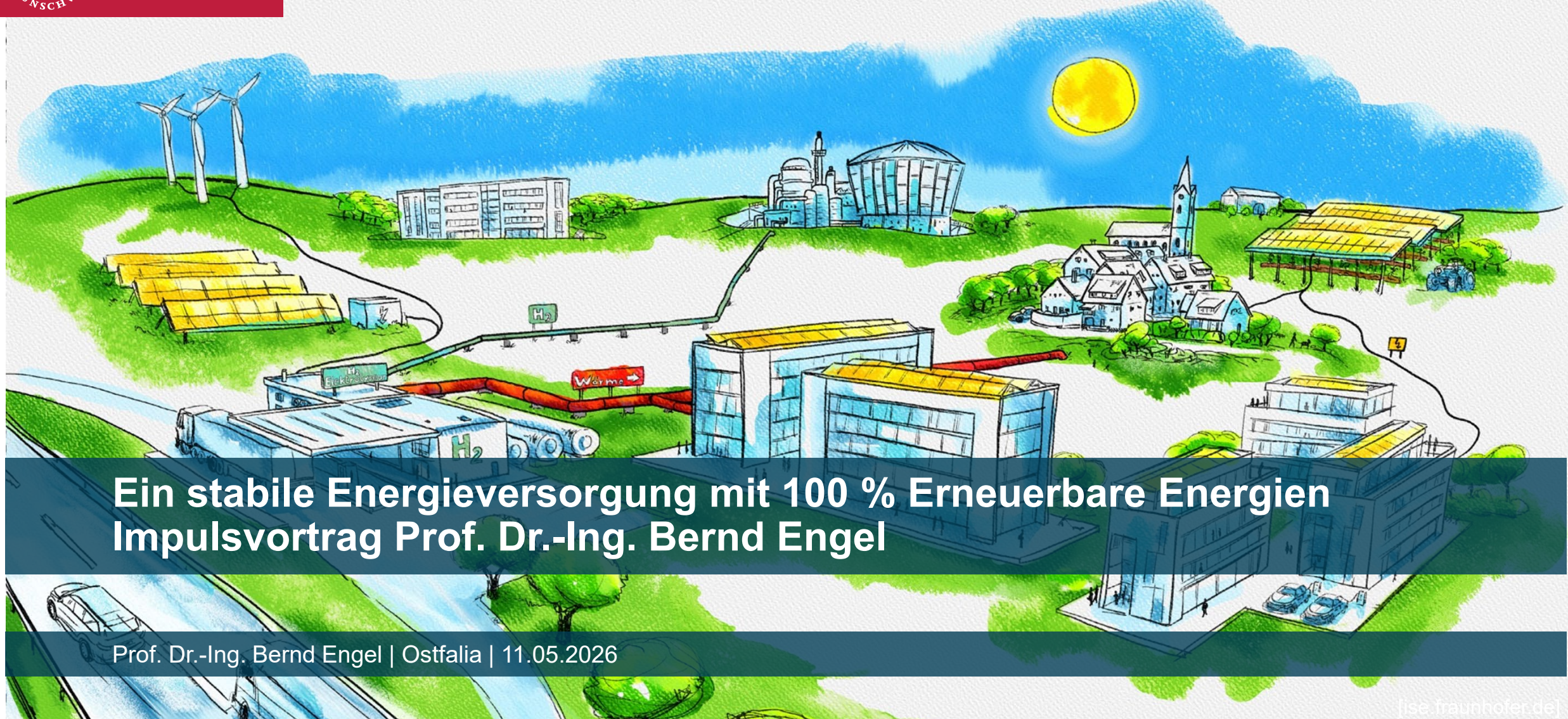




Ein stabile Energieversorgung mit 100 % Erneuerbare Energien

Impulsvortrag Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel

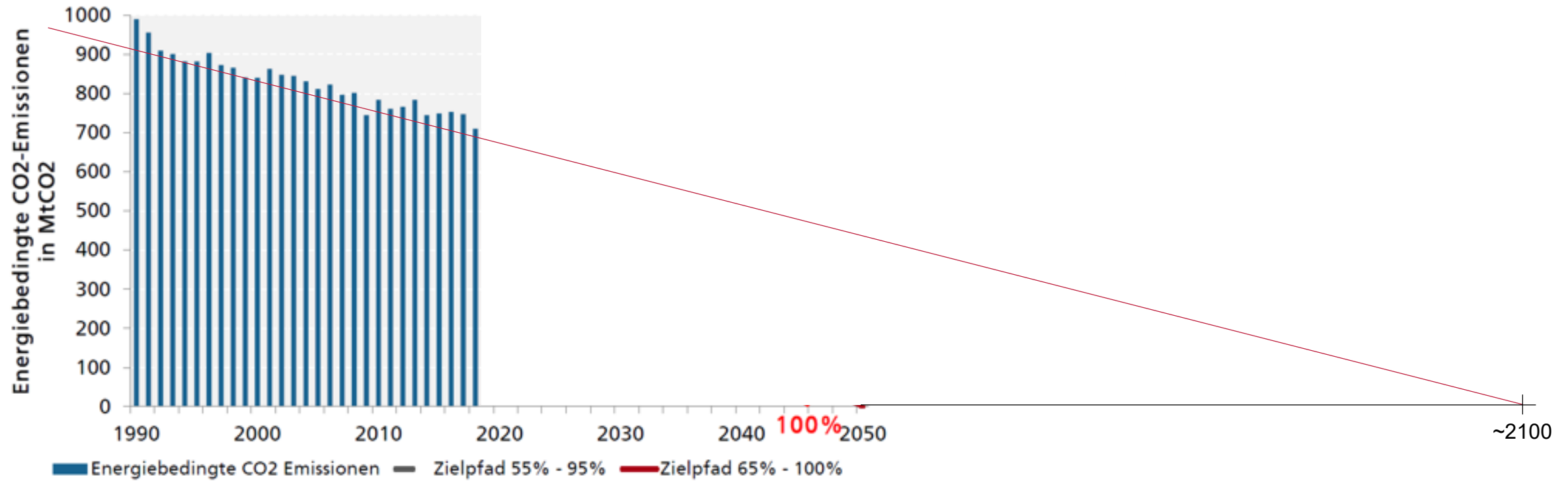
Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel | Ostfalia | 11.05.2026

AGENDA

- Organisatorisches
- **Auf dem Weg zum klimaneutralen Energiesystem**
- Europäisches Verbundnetz und Spannungsebenen in DE
- Einblick in die Energiewirtschaft
- Projektvorstellung: H₂-Terminal Braunschweig
- Erfahrungsbericht als Prosumer



Ziel: Treibhausgasreduktion



[Fraunhofer ISE]

Game-Changer: Urteil des Bundesverfassungsgerichtes am 29.04.2021

Plötzlich soll die Klimaneutralität 2045 erreicht werden (CDU, SPD, Grüne, FDP)

- Nach FFF der zweite Game-Changer in der deutschen Klimapolitik
- "Von diesen künftigen Emissionsminderungspflichten ist praktisch jegliche Freiheit potenziell betroffen, weil noch nahezu alle Bereiche menschlichen Lebens mit der Emission von Treibhausgasen verbunden und damit nach 2030 von drastischen Einschränkungen bedroht sind"
- Luisa Neubauer (FFF-Klägerin): „Gerechter Klimaschutz ist nicht nice to have... Das ist unser Grundrecht, und das wissen wir ab heute offiziell."
- Von der GroKo wurde in Rekordzeit das Klimaschutzgesetz angepasst. Nach 2 Wochen ging es mit dem Ziel Klimaneutralität 2045 durch das Bundeskabinett. Von Bundestag und Bundesrat soll es vor der Sommerpause verabschiedet sein- wegen Wahlkampf?
- Nur Ziele, kaum Maßnahmen

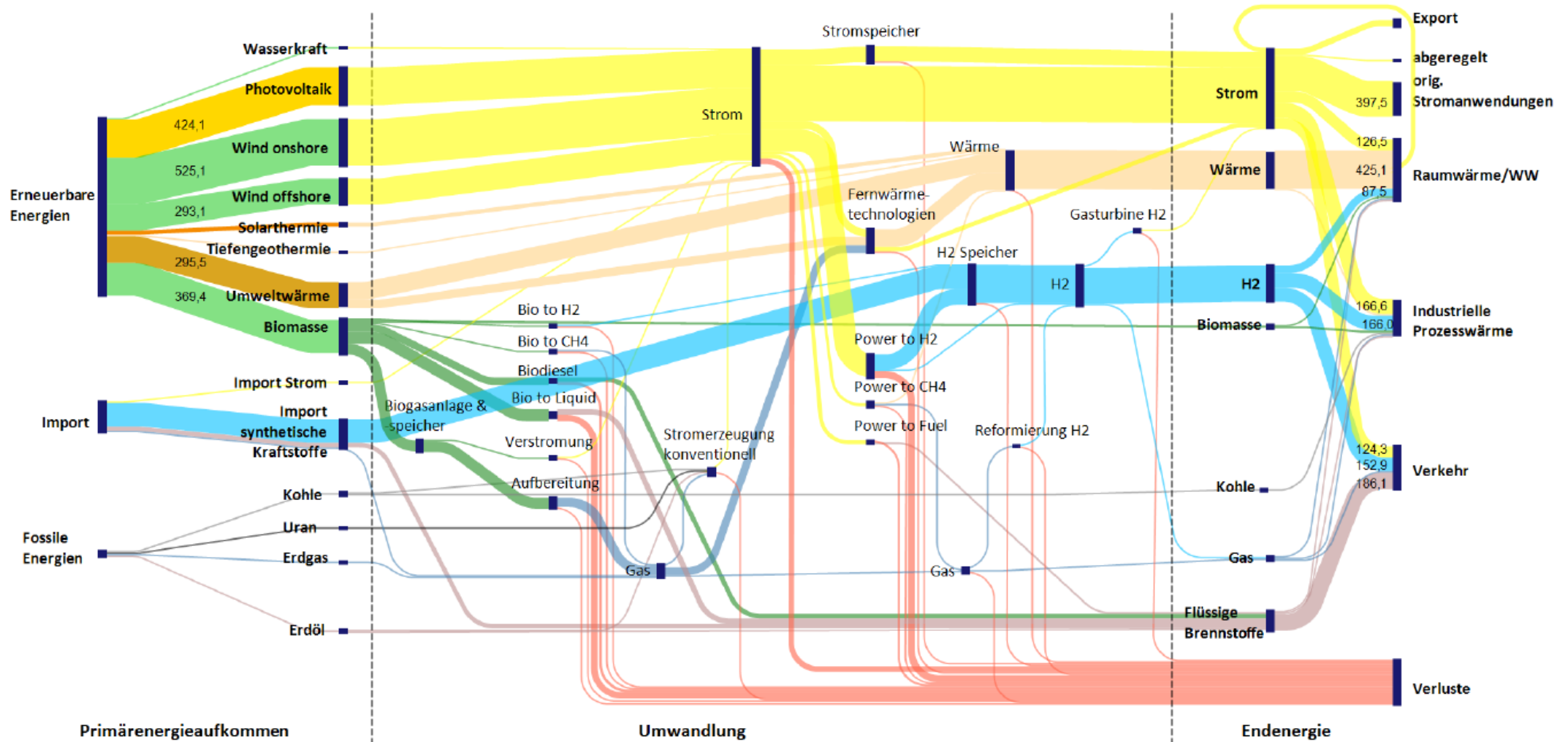


Quelle: tagesschau.de



Quelle: wikipedia.de

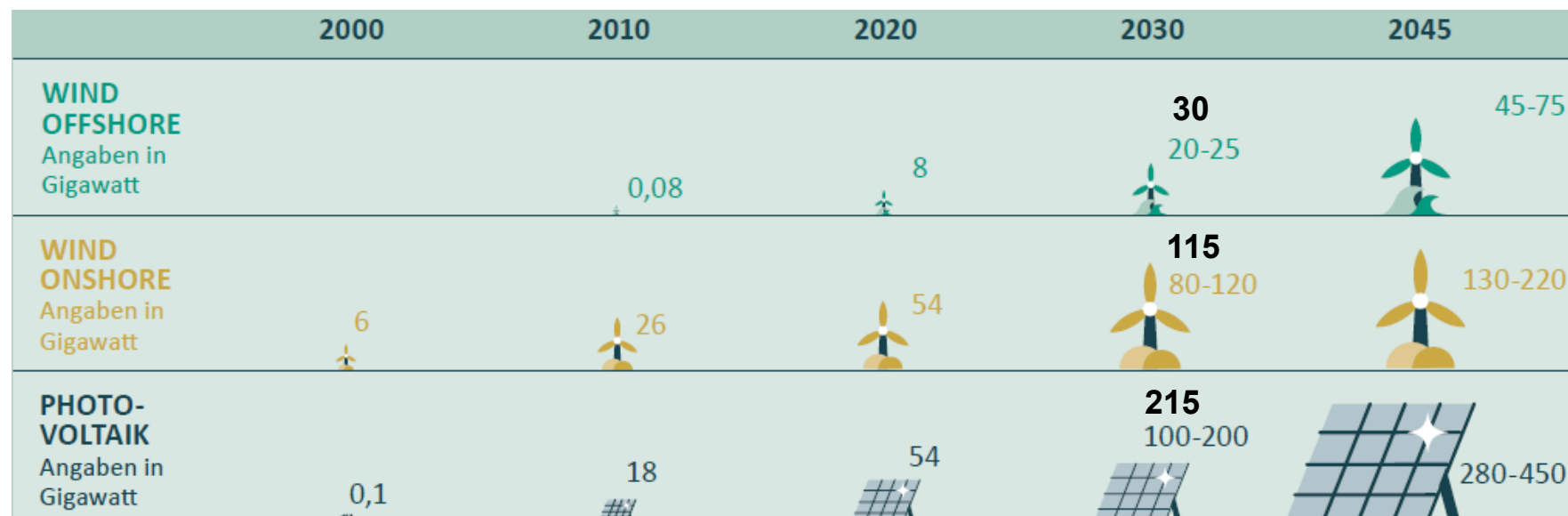
Das Klimaneutrale Energiesystem 2045



[Fraunhofer ISE]

EU-Plan „Fit für 55“, Das deutsche „Osterpaket“ und der Krieg in der Ukraine lösen einen enormen Ausbau von Erneuerbaren Energien (EE) aus

- Erhöhter elektrischer Energiebedarf in Deutschland durch Elektromobilität, power-to-heat etc.
- Installierte Leistung von onshore-Windkraft wird bis 2030 **verdoppelt**, PV-Leistung mehr als **verdreifacht**

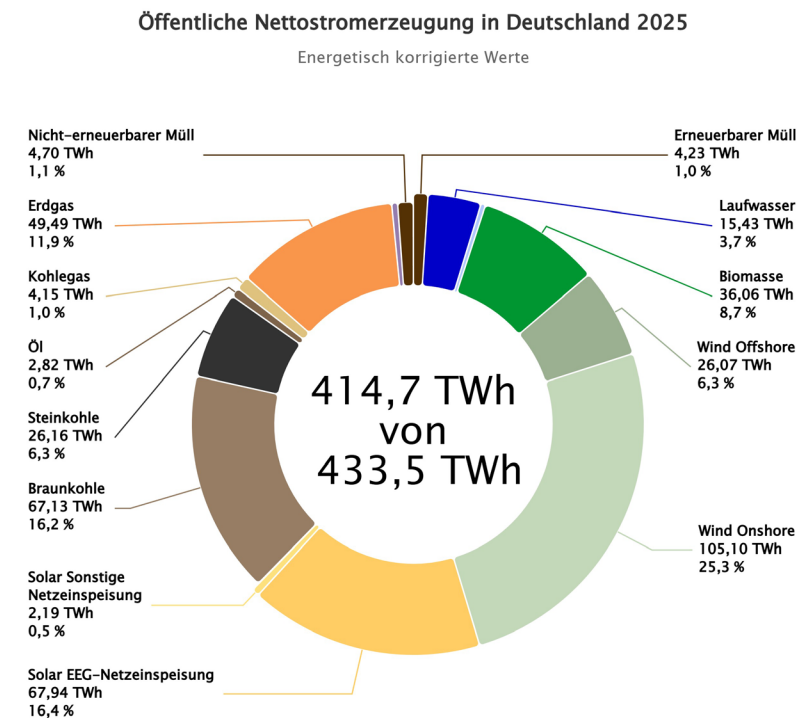


Quelle: ACATECH 2021

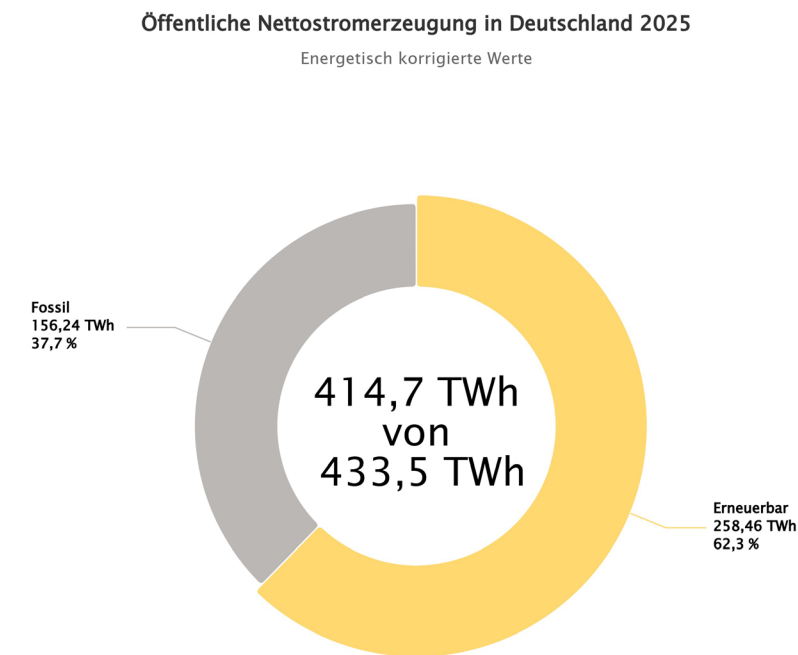
Ziele: Ausbau von EE im „Osterpaket“

→ **Wind- und PV-Energie werden den erhöhten elektrischen Energiebedarf mit weit über 100% decken**

Wie groß war der Anteil der erneuerbaren Energien 2025 im deutschen Netz?



Energy-Charts.info; Datenquelle: ENTSO-E, AGEE-Stat, Destatis, Fraunhofer ISE, AG Energiebilanzen;
Letztes Update: 25.04.2026, 17:45 MESZ



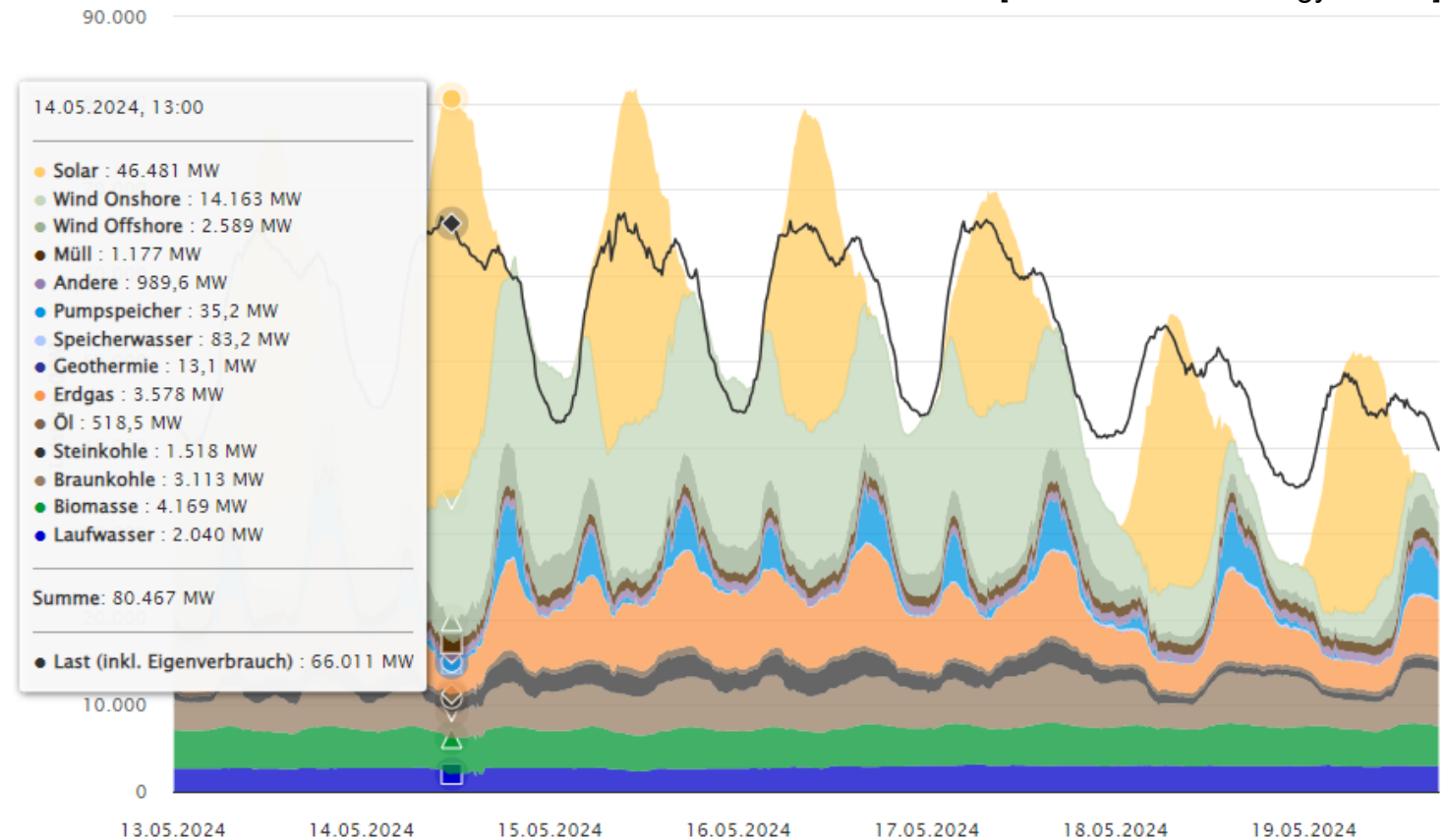
Energy-Charts.info; Datenquelle: ENTSO-E, AGEE-Stat, Destatis, Fraunhofer ISE, AG Energiebilanzen;
Letztes Update: 25.04.2026, 17:45 MESZ

Anteil EE 62,3% im Jahr 2025 [Energy-Charts]

Netto-Stromerzeugung in Deutschland, Mai 2024

- Deutscher PV-Rekord am 14.05.24
 - P = 47,1 GW Einspeisung
 - P = 51,2 GW inkl. Eigenverbrauch
- Negative Strompreise an EPEX Spot
 - 42,95 €/MWh

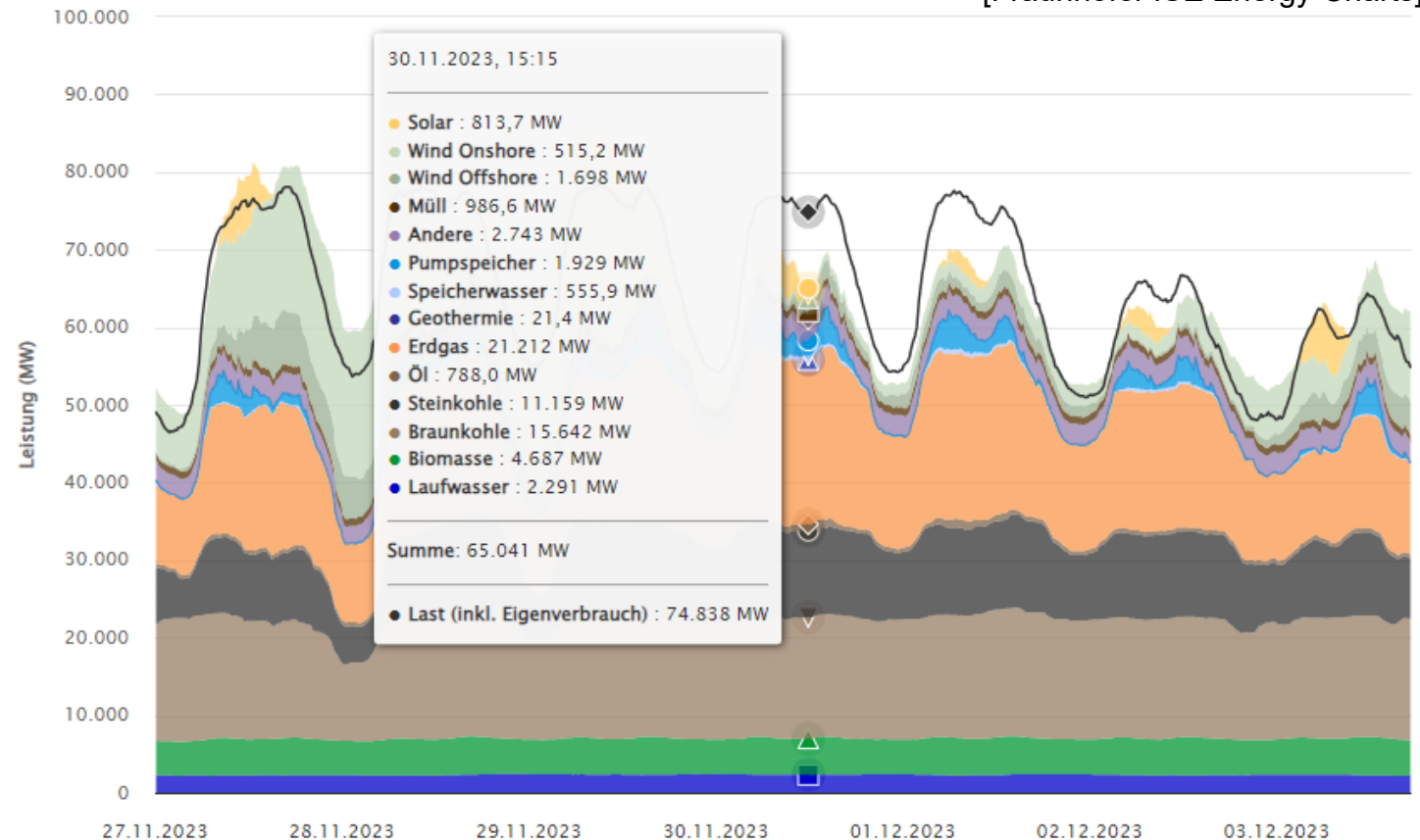
[Fraunhofer ISE Energy-Charts]



Netto-Stromerzeugung in Deutschland, Dezember 2023

- Versorgungssicherheit auch bei **Dunkelflauten** gewährleisten
- Wie schaffen wir das in einem klimaneutralen Deutschland 2045?

[Fraunhofer ISE Energy-Charts]



AGENDA

- Organisatorisches
- Auf dem Weg zum klimaneutralen Energiesystem
- **Europäisches Verbundnetz und Spannungsebenen in DE**
- Einblick in die Energiewirtschaft
- Projektvorstellung: H₂-Terminal Braunschweig
- Erfahrungsbericht als Prosumer



Was ist ein Verbundnetz?

- Zusammenschluss von Elektroenergiesystemen bzw. Regelzonen durch Kuppelleitungen mit benachbarten Elektroenergiesystemen
- Einheitliche Netzfrequenz f für alle Erzeugungs- und Verbrauchsanlagen im Verbundnetz (Verbund- bzw. Synchronbetrieb)
- Gegensatz zu räumlich getrennten Inselnetzstrukturen, welche keinen direkten elektrischen Anschluss zu anderen Stromnetzen besitzen

Deutsches Höchstspannungsnetz

01.01.2028 / © VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., Herausgeber: www.vde.com/fnn

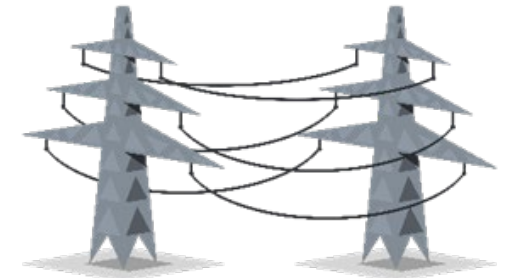


Deutsche Übertragungsnetz (Quelle: FNN im VDE)

Mehrwert eines Verbundnetzes

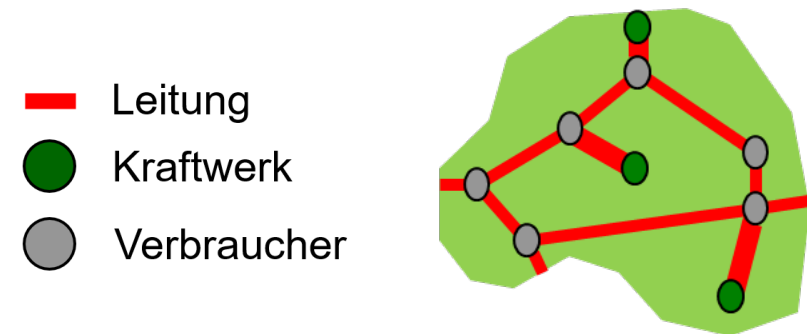
Ein Verbundnetz ermöglicht...

- ... den Bau großer Verbund-Kraftwerksblöcke mit geringeren Investitionskosten je kW installierter Leistung und Stromerzeugungskosten pro kWh
- ... die Verteilung standortgebundener erneuerbarer Energieerzeuger wie Windkraftanlagen
- ... den Ausgleich regional verschiedener Verbrauchsstrukturen (Industrie, Haushalt, Verkehr)
 - reduziert das Verhältnis zwischen höchster Tagesspitze und niedrigster Erzeugung
 - gleichmäßige Ausnutzung der Erzeugungsanlagen und optimale Nutzung des Primärangebotes
- ... die Sicherung der Netzstabilität beim Ausfall großer Kraftwerksblöcke [(n-1)-Kriterium]



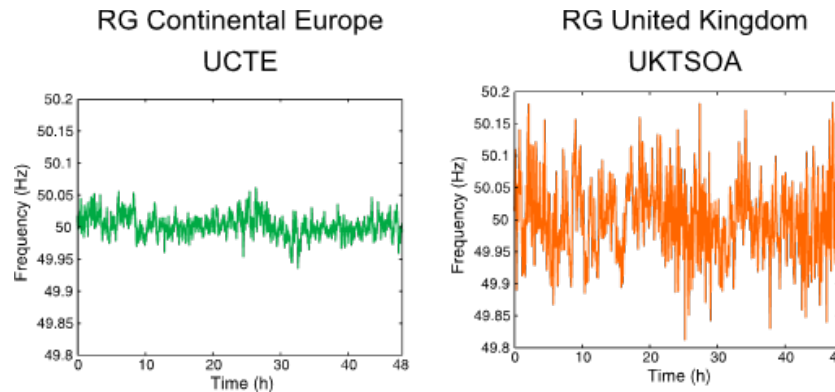
Versorgungssicherheit im Verbundnetz

- Das **(n-1)-Kriterium** im Kontext der Netzplanung besagt, dass in einem Netz bei prognostizierten maximalen Übertragungsleistung die Netzsicherheit gewährleistet bleibt, wenn ein Netzbetriebsmittel ausfällt oder abgeschaltet wird
- Das (n-1)-Kriterium ist erfüllt, wenn durch den Ausfall eines Freileitungs- oder Kabelstromkreises oder eines Transformators Folgendes ausgeschlossen werden kann:
 - Dauerhafte Grenzwertverletzung der Betriebsmittel in Hinblick auf die Netzbetriebsgrößen (z.B. Einhaltung der Spannungsbänder)
 - Versorgungsunterbrechung
 - Störungsausweitung
 - Stabilitätsverlust von Erzeugungseinheiten
 - Änderungen und ggf. Unterbrechungen von Übertragungen
- Durch die dezentrale Erzeugungsstruktur innerhalb eines „vermaschten“ Verbundnetzes weist das System aus statistischen Gründen ein hohes Maß an Redundanz und damit auch an Versorgungssicherheit auf.

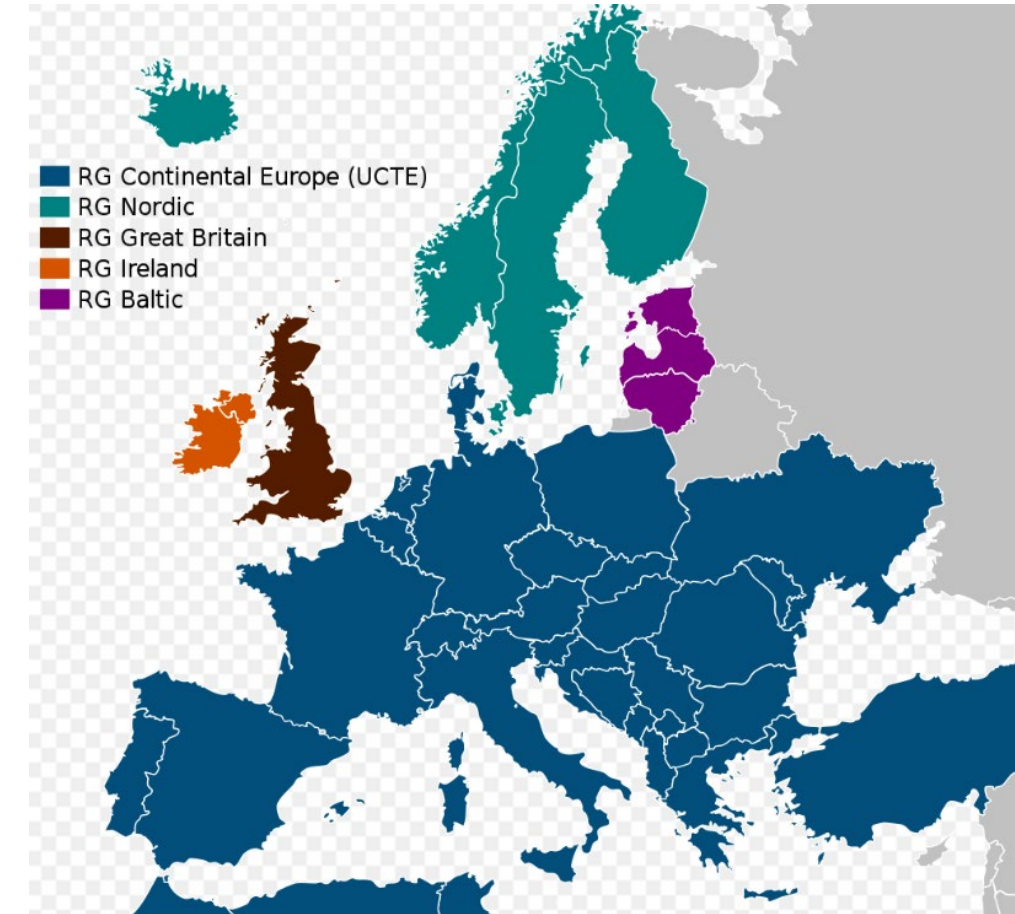


Das europäische Verbundnetz

- Seit Anfang 2009 befinden sich die fünf europäischen Verbundsystem-Verbände in dem Verband „European Network of Transmission System Operators for Electricity“ (**ENTSO-E**)
- Die nordischen Länder betreiben aus technischen Gründen keine mit dem UCTE-Netz synchronisierte Übertragungsnetze
 - Stromtausch erfolgt über Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ)



- Aufteilung des Verbundsystems in Regelzonen und Übertragungsnetzbetreiber
 - In Deutschland existieren vier Regelzonen mit je einem Übertragungsnetzbetreiber

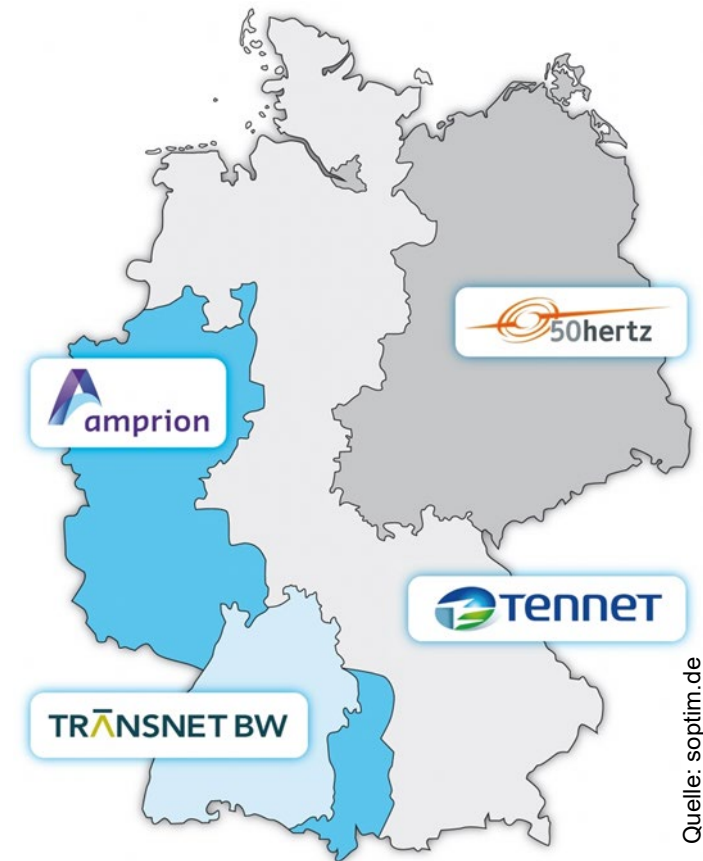


Übertragungsnetztreiber

Ein Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB, engl. Transmission System Operator, TSO) hat den Auftrag ein „sicheres, zuverlässiges und leistungsfähiges Energieversorgungsnetz diskriminierungsfrei zu betreiben, zu warten und bedarfsgerecht zu optimieren, zu verstärken und auszubauen[...]“

§ 11 Abs. 1 S. 1 EnWG

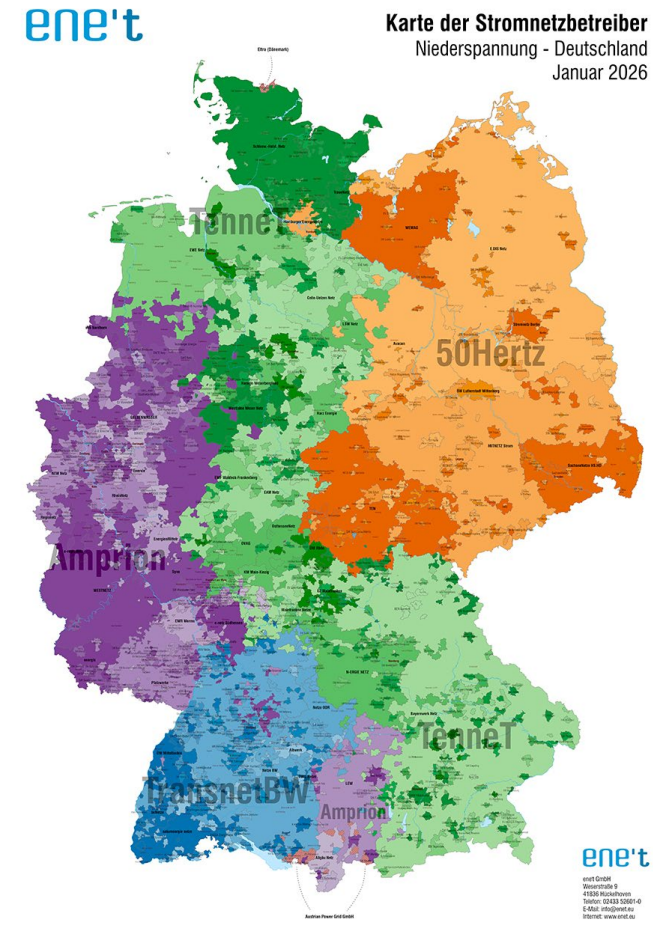
- Konkret bedeutet dies:
 - Gewährleistung eines störungsfreien Stromaustausches
 - Festlegung der benötigten Menge und Einsatz der Regelleistung (Frequenzhaltung)
 - Netzstabilität
 - Netzwiederaufbau nach Großstörungen
 - Erstellen von Tagesprognosen für Last, Erzeugung und Verluste



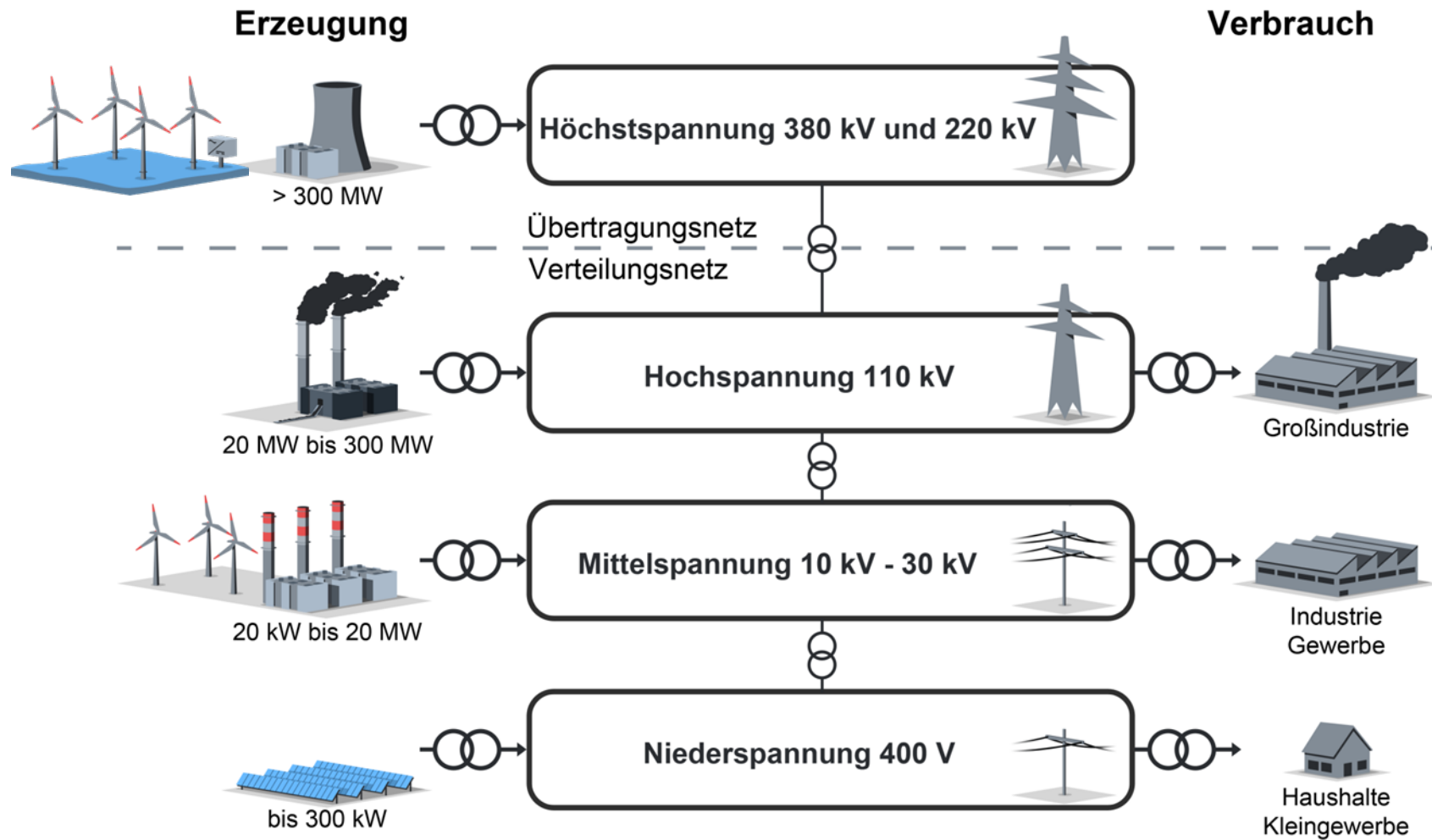
Übertragungsnetzbetreiber in Deutschland

Verteilungsnetzbetreiber

- Ein Verteilungsnetzbetreiber (VNB, engl. distribution system operator, DSO) ist dem ÜNB nachgelagert
- Ist ein Unternehmen, das für die Verteilung von Strom an den Endverbraucher (private Haushalte und Kleinverbraucher) zuständig ist
- Unterhält in erster Linie Stromnetze im Nieder- und Mittelspannungsbereich aber auch Hochspannungsnetze



Spannungsebenen in Deutschland

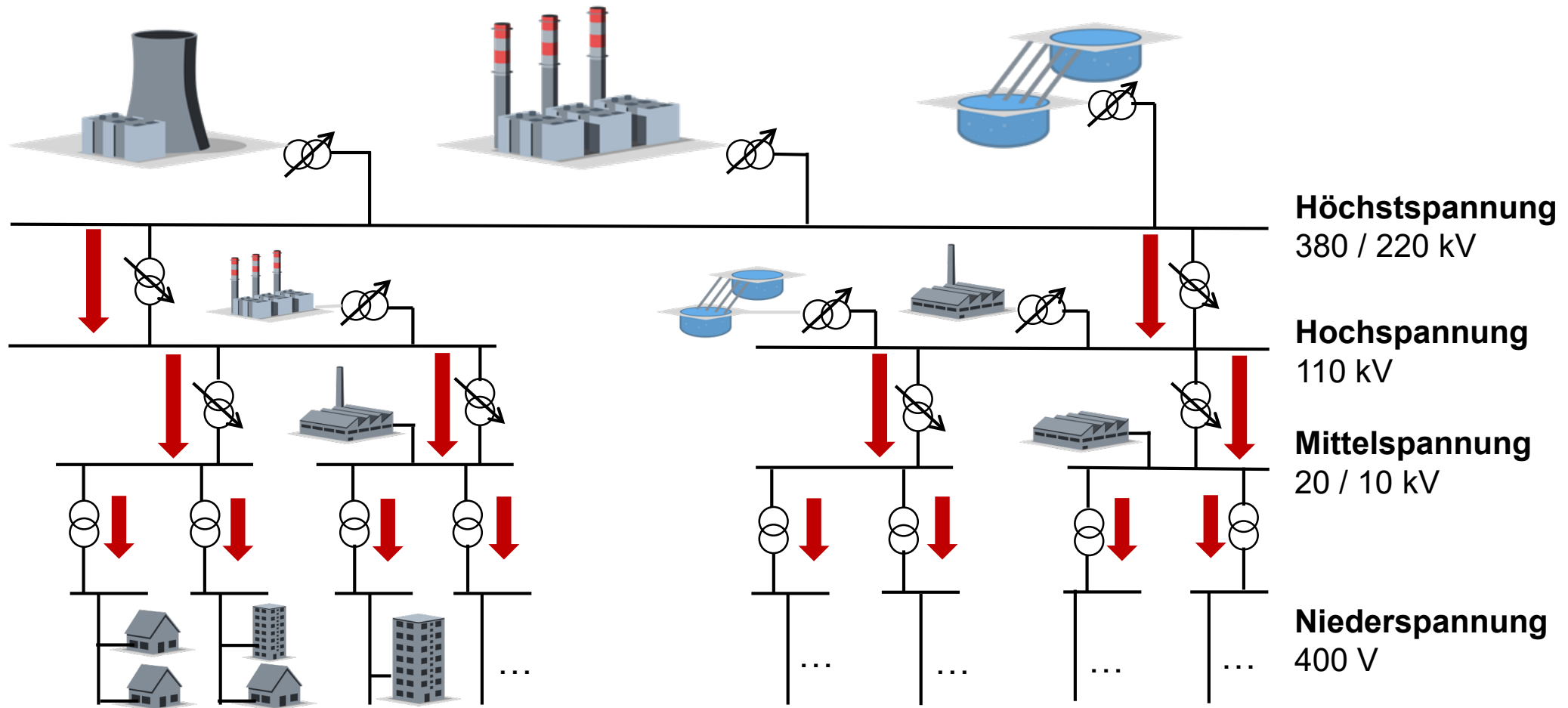


Netzebenen in Deutschland



Wie ist das Stromversorgungssystem aufgebaut ?

– Netzebenen und Top-Down Prinzip



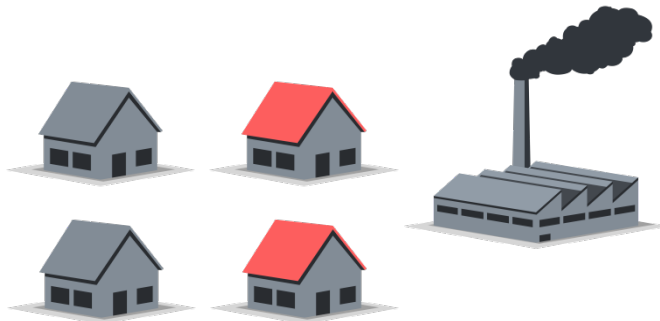
Herausforderungen und Lösungsansätze der Energiewende

Früher

- Erzeugung aus zentralen Großkraftwerken

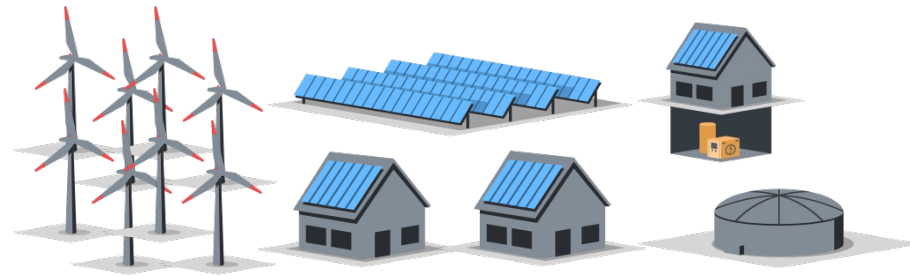


- Versorgung dezentraler Lasten



Heute / Zukünftig

- Versorgung zunehmend aus dezentralen, erneuerbaren Erzeugungsanlagen



- Versorgung dezentraler, intelligenter Lasten; Consumer werden zu Prosumern

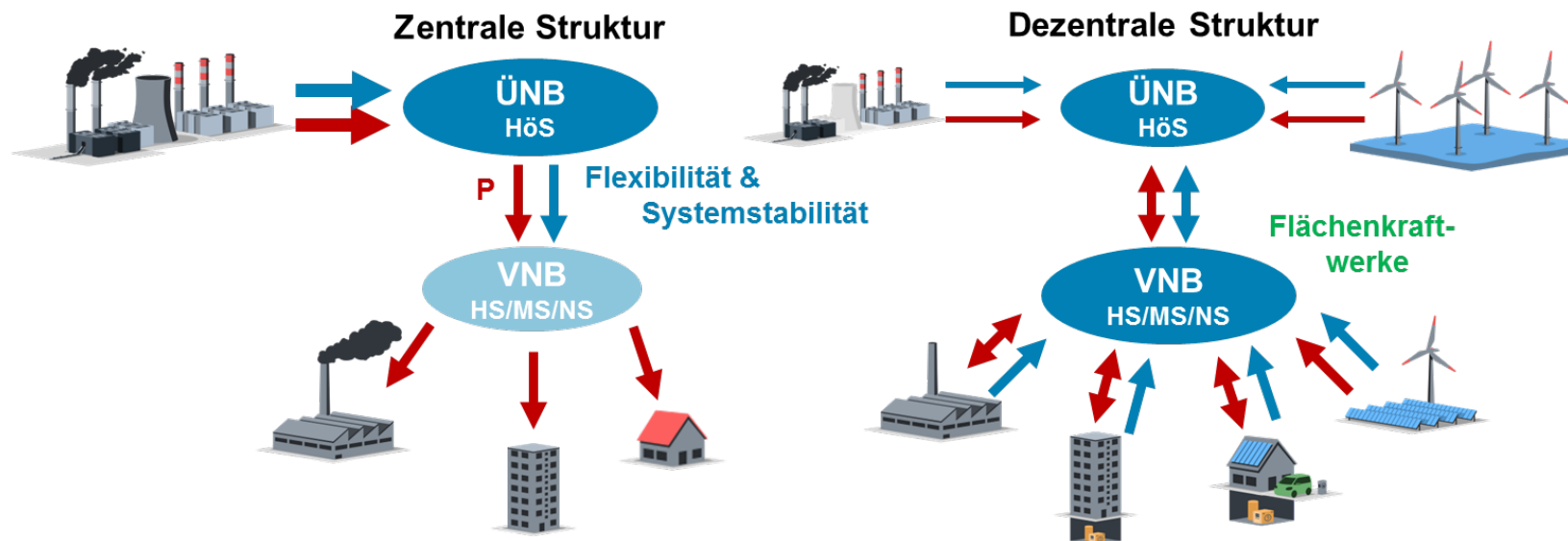


- Neue Elemente: Batteriespeicher, Wärmepumpen, Elektrofahrzeuge



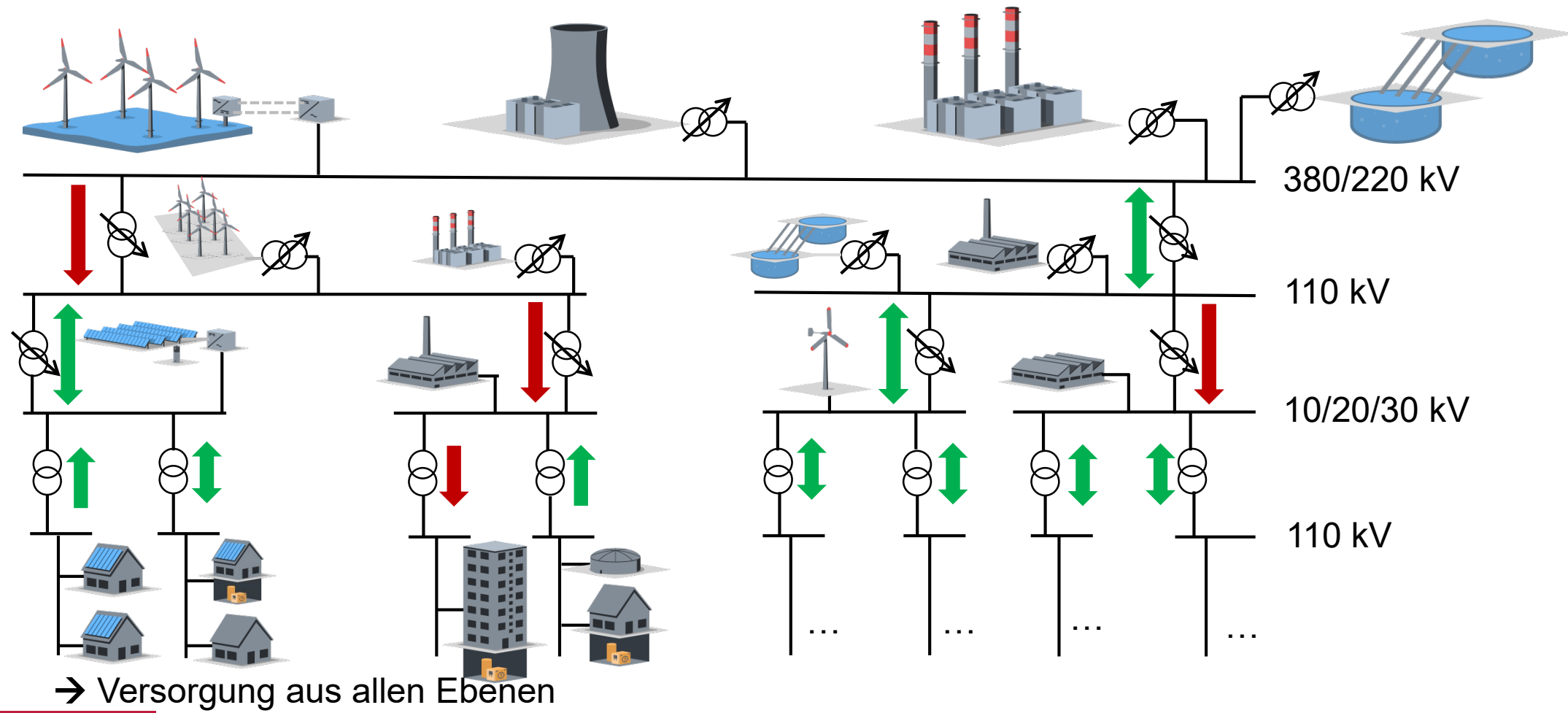
Herausforderungen und Lösungsansätze der Energiewende

- Steigender Anteil erneuerbarer Energien führt zu:
 - **bidirektionalen Wirk- und Blindleistungsflüssen**
 - Bedarf für Systemdienstleistungen aus dezentralen Energieanlagen (DEA)
 - Herausforderung: **fluktuierendes Verhalten**
 - Höhere Verfügbarkeit durch: **virtuelle Kraftwerke** oder „**Flächenkraftwerke**“



Netzstruktur in Deutschland heute

– Top-Down und Bottom-Up

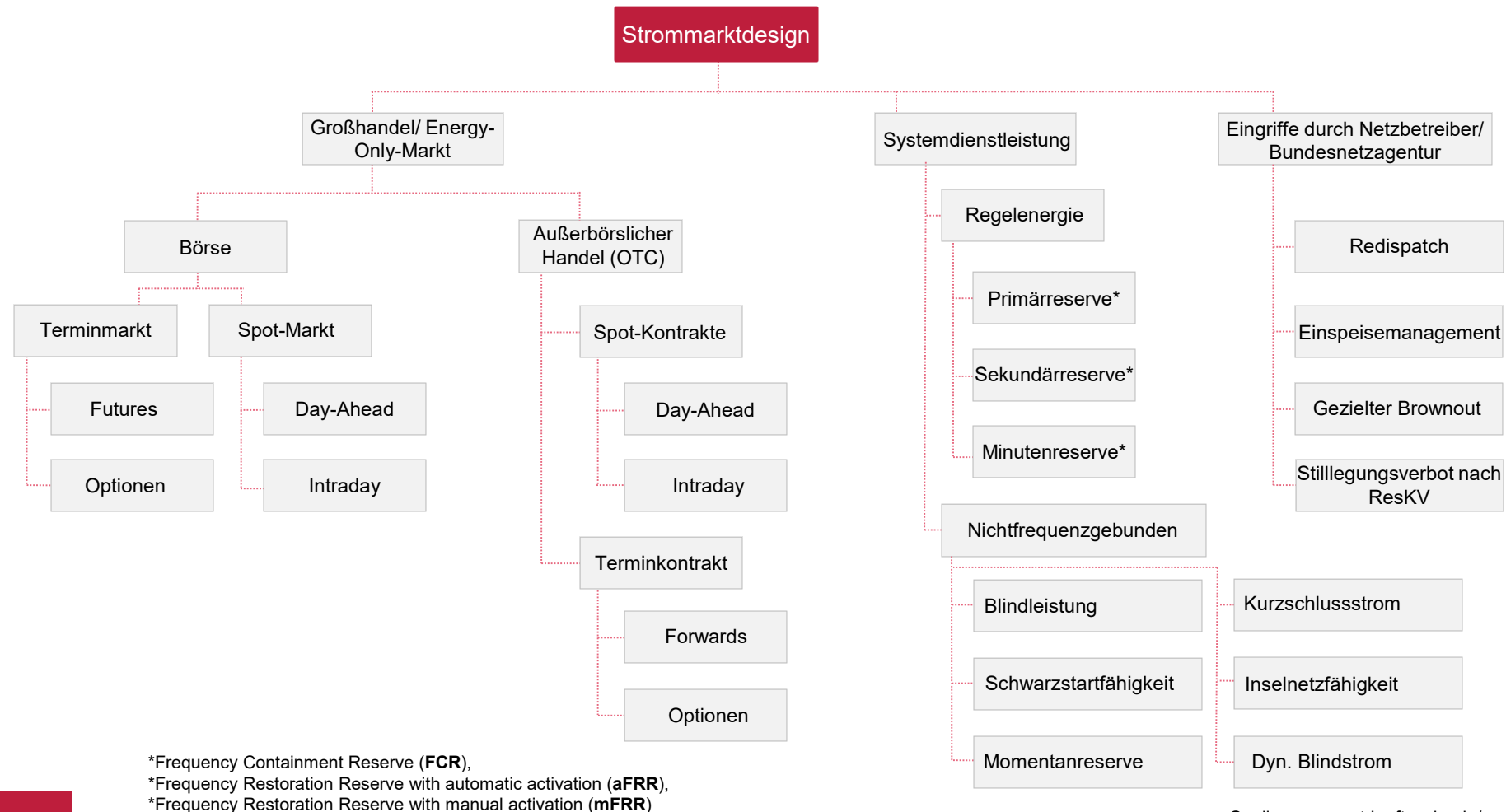


AGENDA

- Organisatorisches
- Auf dem Weg zum klimaneutralen Energiesystem
- Europäisches Verbundnetz und Spannungsebenen in DE
- **Einblick in die Energiewirtschaft**
- Projektvorstellung: H₂-Terminal Braunschweig
- Erfahrungsbericht als Prosumer

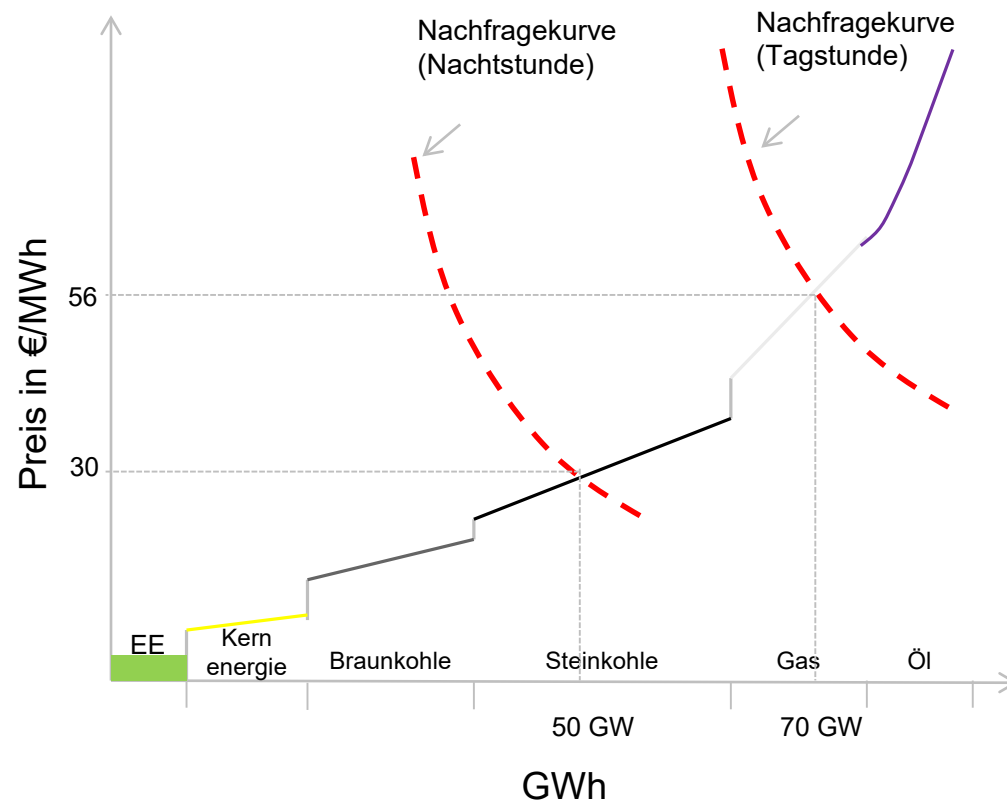


Strommarktdesign



Quelle: www.next-kraftwerke.de/

Preisbildung am Spotmarkt – Merit Order



Preisbildung

- Für jede Stunde des folgenden Tages wird am Spotmarkt eine Merit Order der verfügbaren Kraftwerksleistung erstellt
- Das letzte noch benötigte Grenzkraftwerk bestimmt mit seinen Grenzkosten den „Markträumungspreis“ der Stunde, den **ALLE** Verkäufer erhalten und **ALLE** Käufer zu zahlen haben.

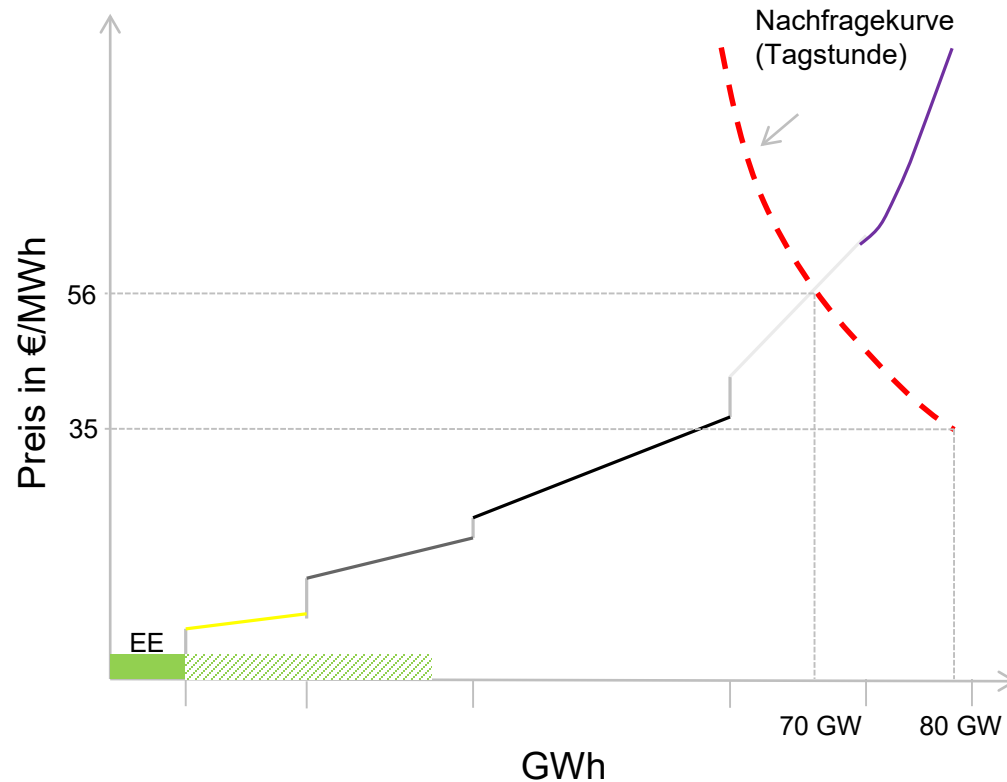
➤ Kraftwerke die Grenzkosten unter dem Markträumungspreis besitzen können Profite einstreichen

Bsp.: Kernkraftwerk mit 1.000 MW:
ca. 200 Mio. €/a

Die am Spotmarkt teilnehmenden Kraftwerke werden Kostenoptimal der Reihe nach aufgereiht (Merit Order Kurve). Die Kraftwerke bieten als Verkaufspreis ihre „Grenzkosten“ (Stromgestehungskosten) an.

Einfluss der Erneuerbaren Energien auf den Markt

Merit Order Effekt



Merit Order Effekt

- Aufgrund der Abnahmeversicherung der eingespeisten erneuerbaren Energiemengen besitzen diese Grenzkosten von 0€/MWh
 - EE stehen Links in der Merit Order Kurve
 - Verschiebung der Merit Order Kurve nach rechts
- Niedriger Strompreis führt zu leicht erhöhter Nachfrage
- Benötigte Konventionelle Kraftwerksleistung sinkt
 - letztes Grenzkraftwerk ist nicht mehr ein Gas, sondern ein Kohlekraftwerk
 - Markträumungspreis sinkt

Erneuerbare Energiemengen reduzieren den Strompreis an der Börse.

AGENDA

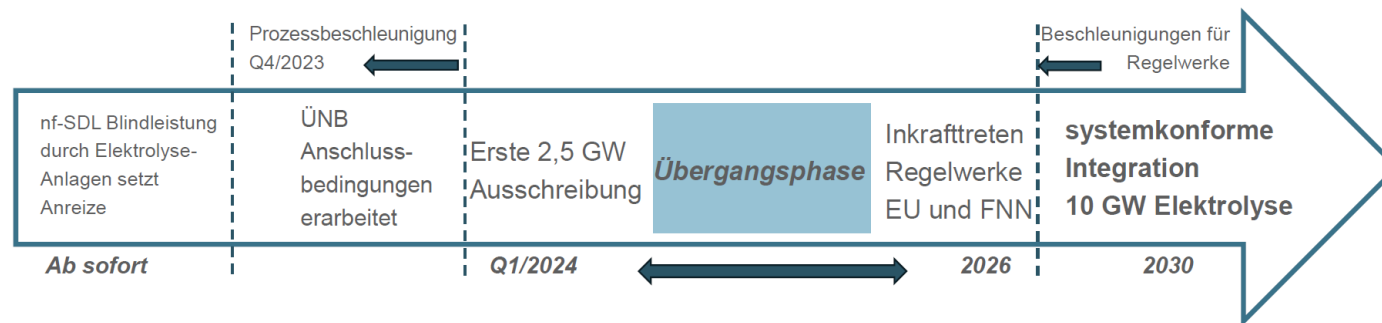
- Organisatorisches
- Auf dem Weg zum klimaneutralen Energiesystem
- Europäisches Verbundnetz und Spannungsebenen in DE
- Einblick in die Energiewirtschaft
- **Projektvorstellung: H₂-Terminal Braunschweig**
- Erfahrungsbericht als Prosumer



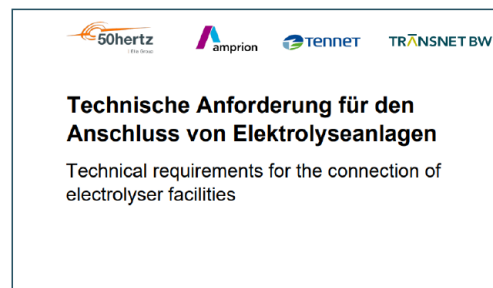
“Elektrolyse-Anlagen ohne systemstützende Eigenschaften haben keine Zukunft”

Stromnetzintegration von Elektrolyse-Anlagen als ein großes Thema der nächsten Jahre

Anforderungen an Elektrolyse-Anlagen

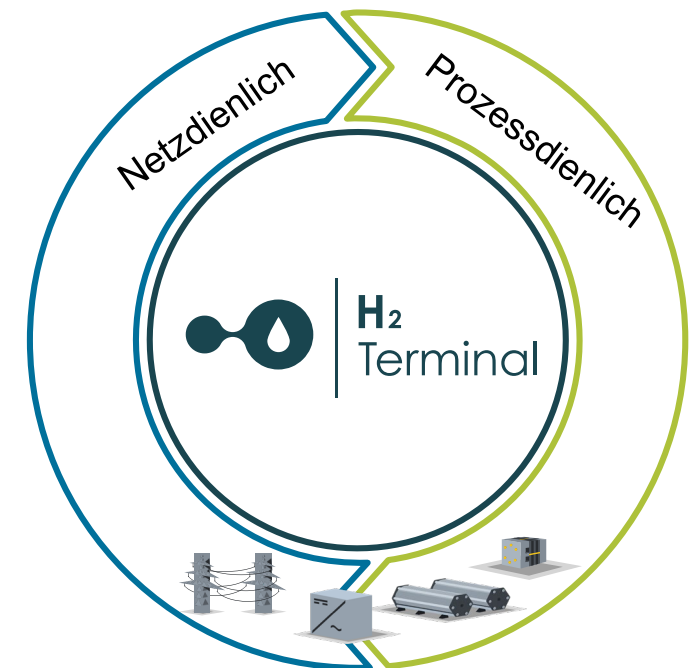


- Aus Sicht der ÜNB müssen Elektrolyse systemstützende Eigenschaft aufweisen, um den Herausforderungen der Systemstabilität zu begegnen
- Bereits 10 GW Elektrolyse-Anlagen bis 2030 sind hier kritisch zu bewerten
- ÜNB erarbeiteten bereits in 2023 technische Anschlussbedingungen für Elektrolyse-Anlagen
- Ab 2026 gelten auch europaweit Anforderungen an Elektrolyse-Anlagen per EU-Verordnung
- Pilot-Designs sollten proaktiv die ÜNB-Anforderungen aufnehmen
- Elektrolyse-Anlagen ohne systemstützende Eigenschaften haben keine Zukunft



Konferenz Roadmap Systemstabilität 18.04.2024 6

Wie lässt sich prozessdienlich und netzdienlich bei Elektrolyseuren vereinen?



Neubau des H₂ Terminal Braunschweig am Flughafen

Ziel: Forschung an Erzeugungstechnologien von grünem Wasserstoff und dessen Wirkungskette

„Wir haben mit diesem Forschungsprojekt die Möglichkeit, eine Energiezentrale der Zukunft umzusetzen und die Energiewende erlebbar zu machen. Nebenbei dekarbonisieren wir einen Teil der Forschung und schaffen mit der neuen Forschungsumgebung einen Nukleus für zukünftige Projekte und wissenschaftliche Arbeiten rund um das Thema Wasserstoff“

- David Sauss, Leiter des siz energieplus und Bauherr

„Mit dem H₂-Terminal Braunschweig wird im Megawattmaßstab erforscht, wie Elektrolyseure und zugehörige Batterien das Stromnetz stabilisieren können, wenn konventionelle, fossile Kraftwerke abgeschaltet sind“

- Prof. Bernd Engel, Leiter des elenia und Sprecher des Verbundprojektes an der TU Braunschweig



H₂ - Tank



Wasser-Wärmespeicher



Wechselrichter, Trafo
und Schaltanlage



Batteriespeicher



Bifaziale PV



Dach PV

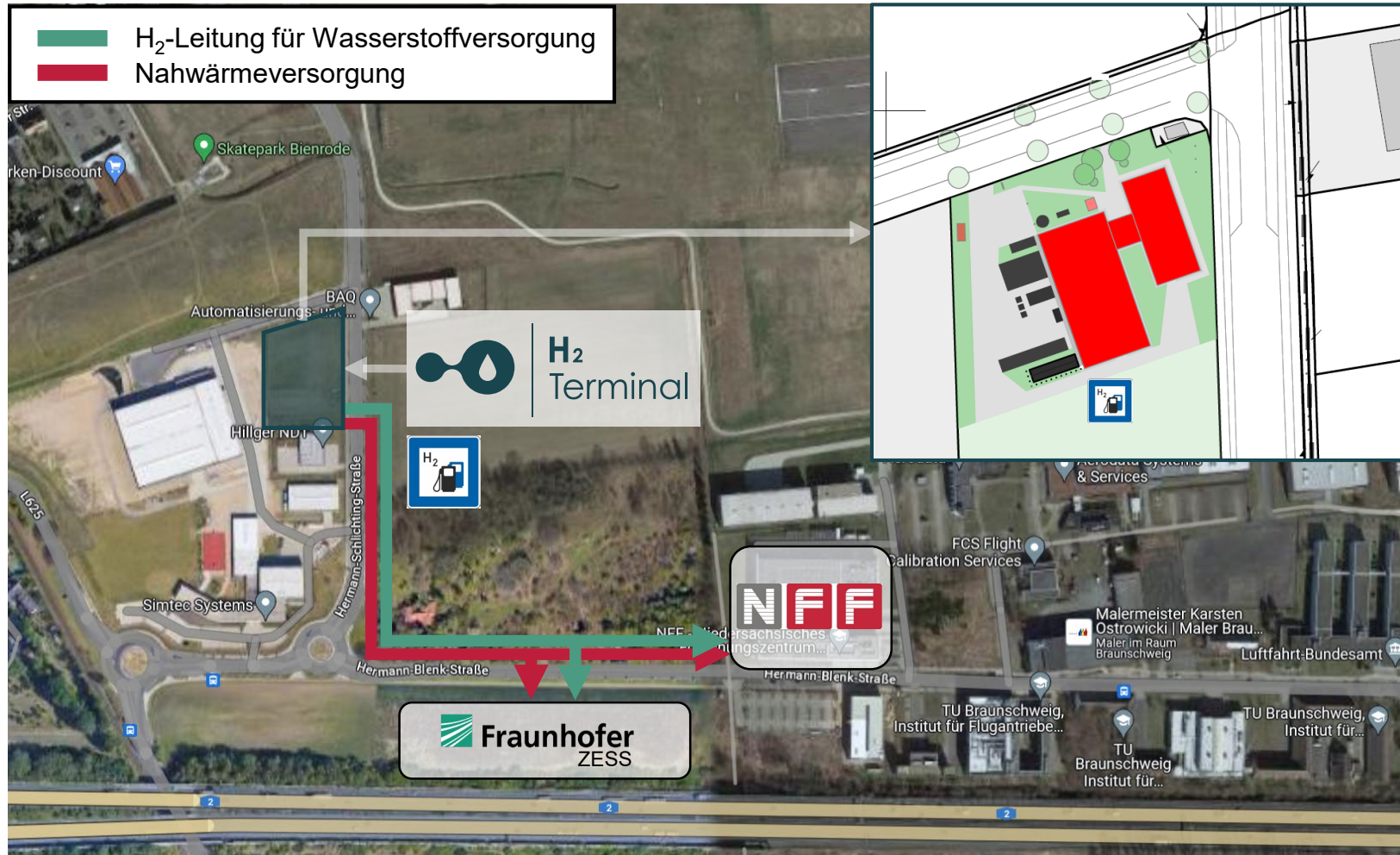
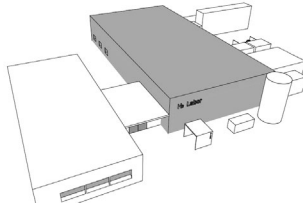


H₂-Tankstelle



AEM - Elektrolyseur

Standort des H₂ Terminal Braunschweig




H₂
Terminal



- AEM Elektrolyseur: 1 MW



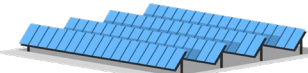
- H₂-Tank: 73 m³, 35 bar



- H₂-Tankstelle (LKW): 350 bar

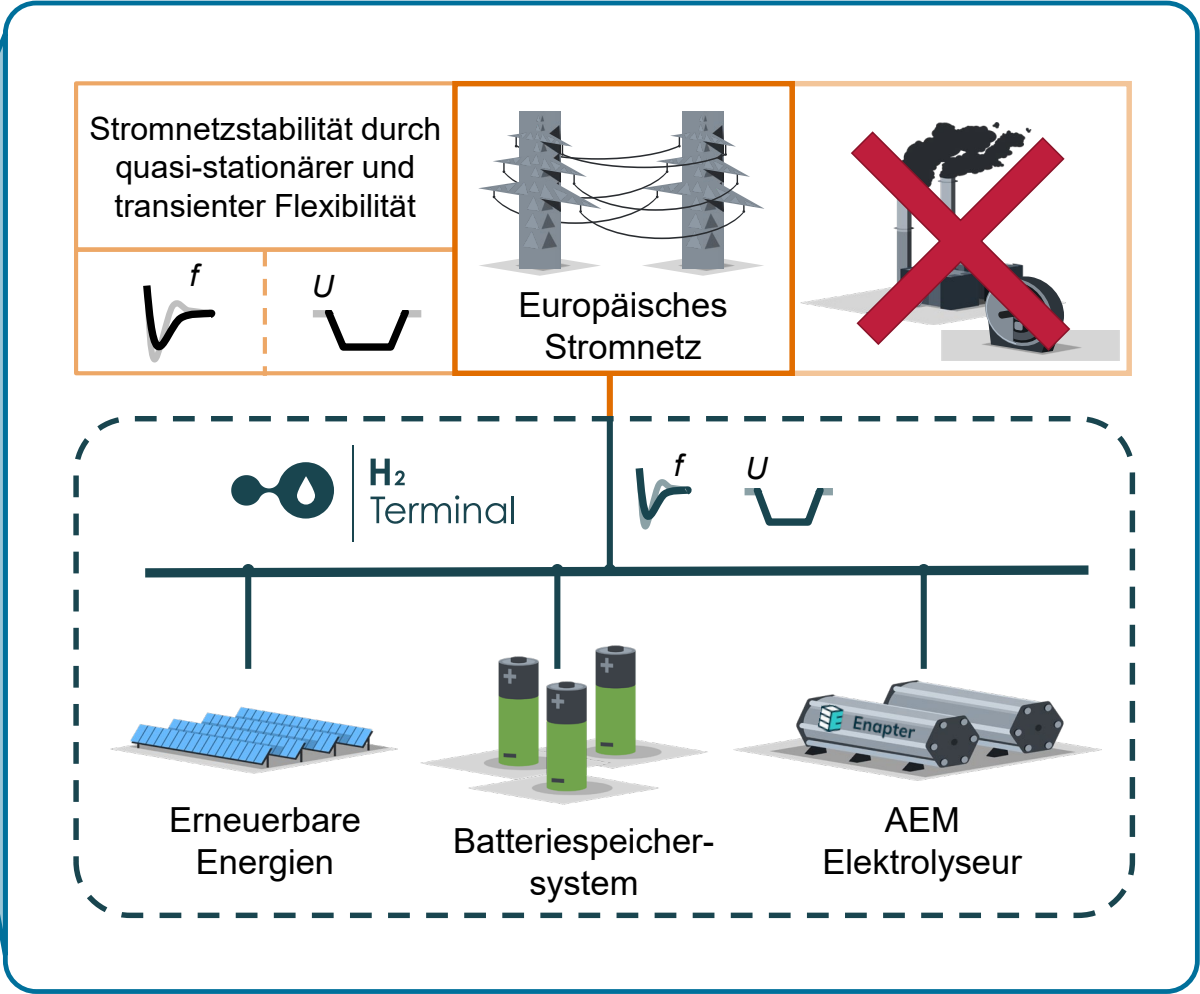
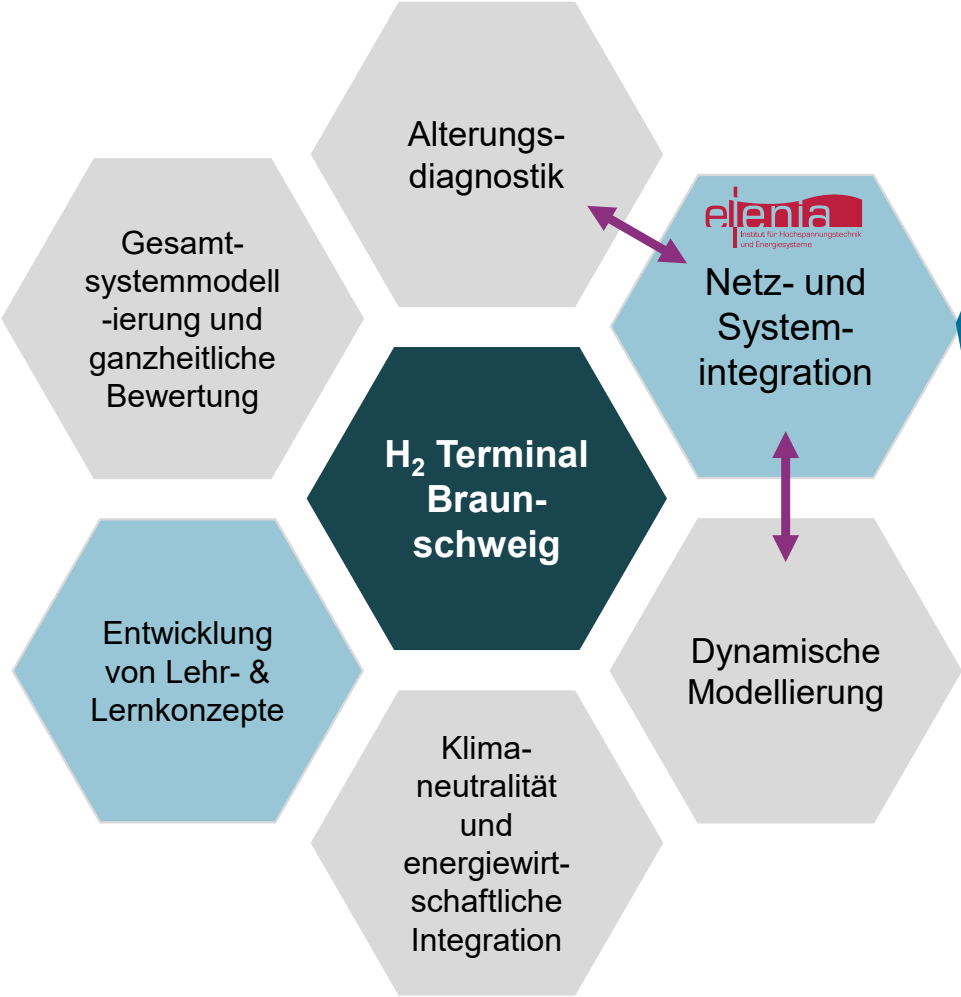


- Batteriespeicher: 1,1 MWh



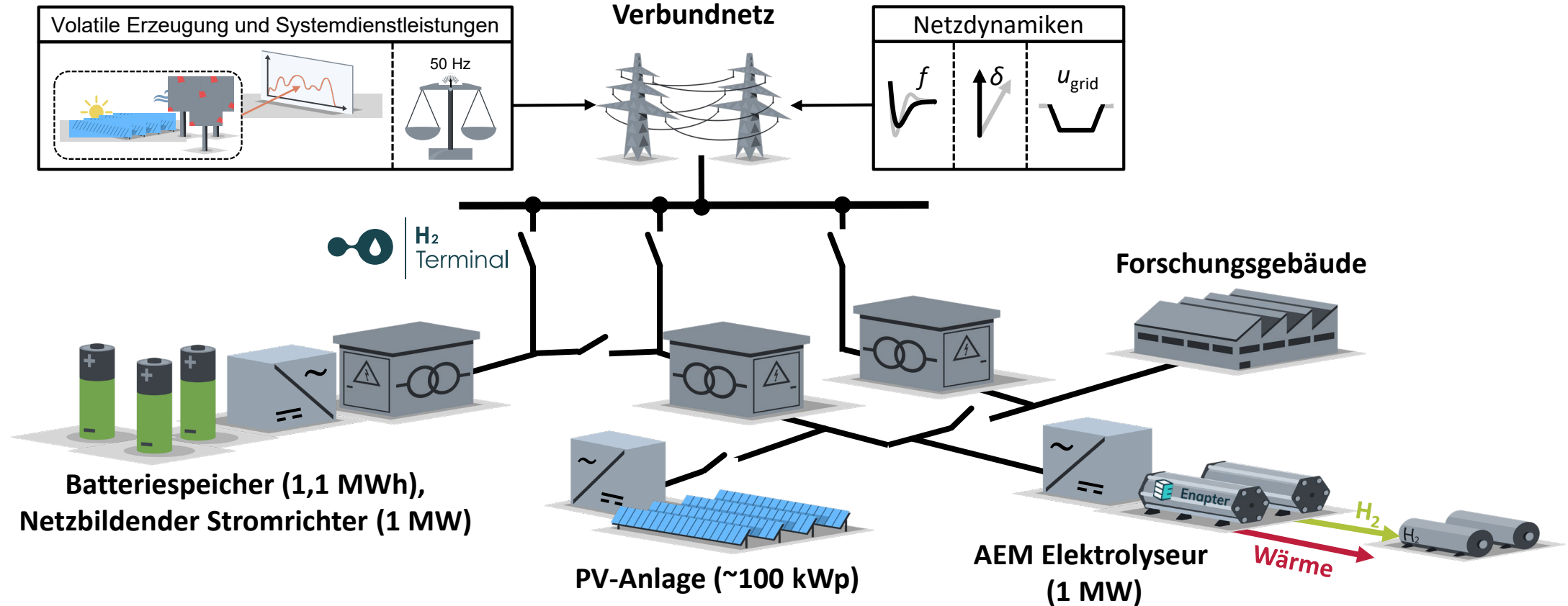
- PV-Anlage: ~100 kWp

Forschungsfelder des H₂ Terminal Braunschweig



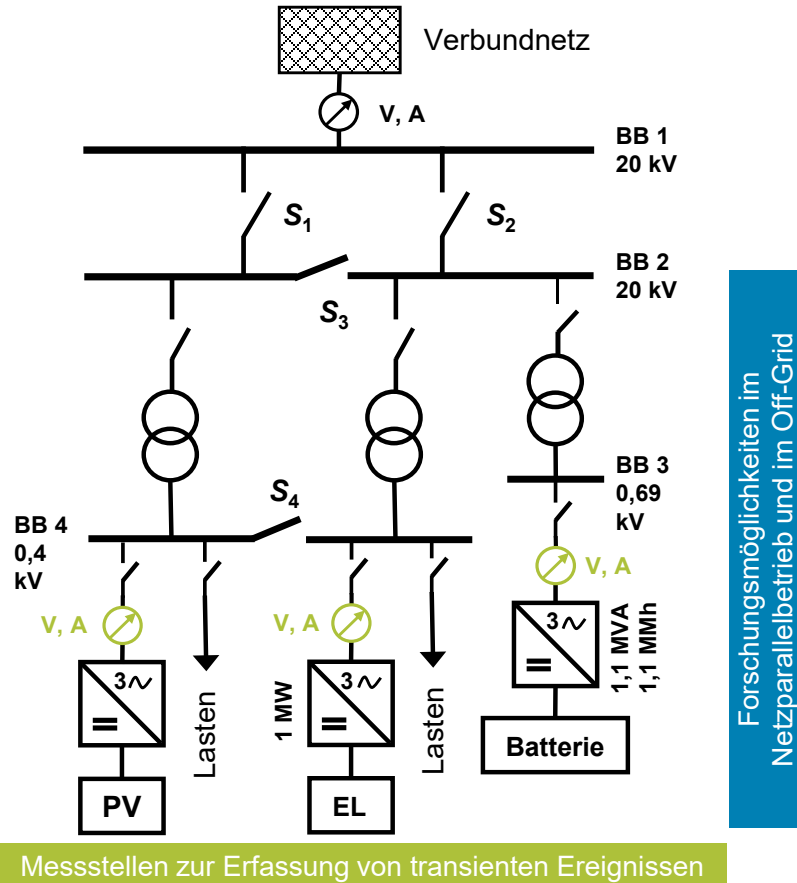
Netzintegration des H₂ Terminal Braunschweig

Netzdienlichkeit erneuerbarer Energien ist ein entscheidender Faktor bei der Transformation zum klimaneutralen Energiesystem



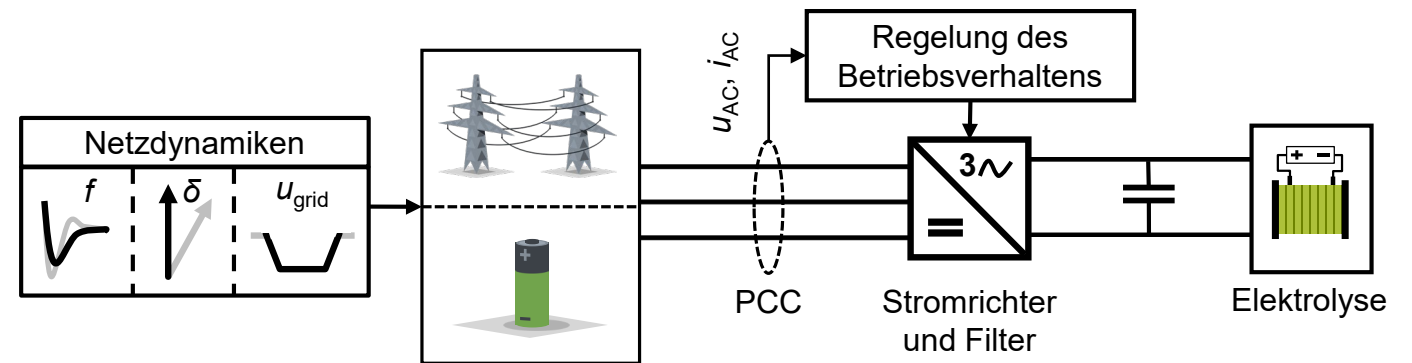
Elektrischer Aufbau des H₂ Terminal Braunschweig

Das elektrische Design ermöglicht die Erforschung vielfältiger Forschungsfragen im Bereich Netzintegration erneuerbarer Energien

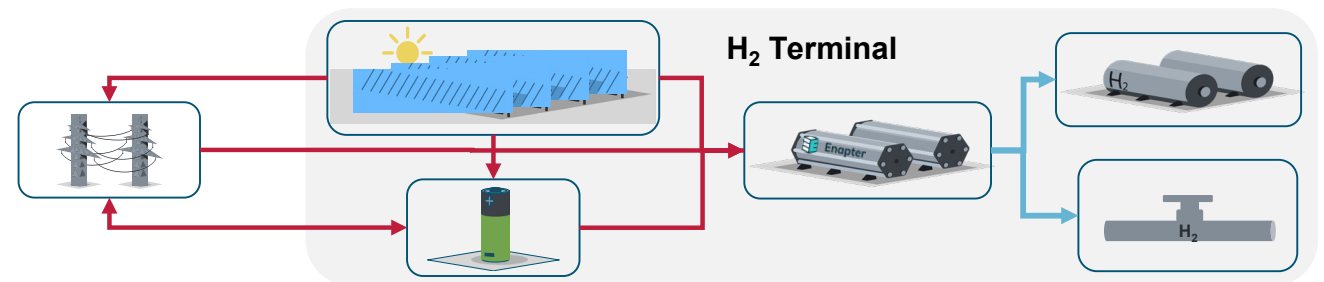


Forschungsmöglichkeiten im
Netzparallelbetrieb und im Off-Grid

1 Beitrag von Elektrolyseuren und Batteriespeichersystemen zur transienten Netzstabilität

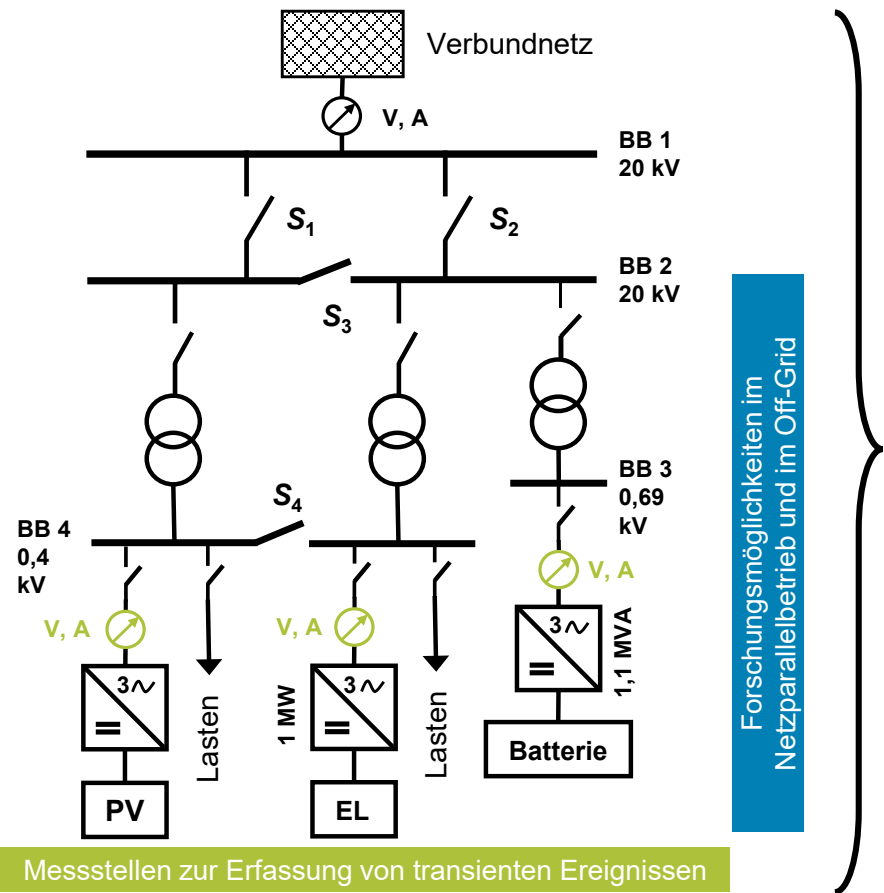


2 Betriebskonzepte aus EE-Erzeugung, Batteriespeichersystemen und Elektrolyseuren

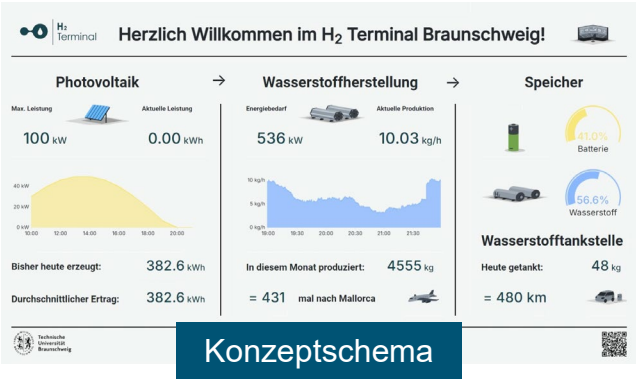


Elektrischer Aufbau des H₂ Terminal Braunschweig

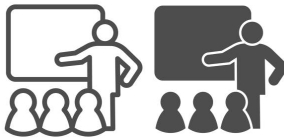
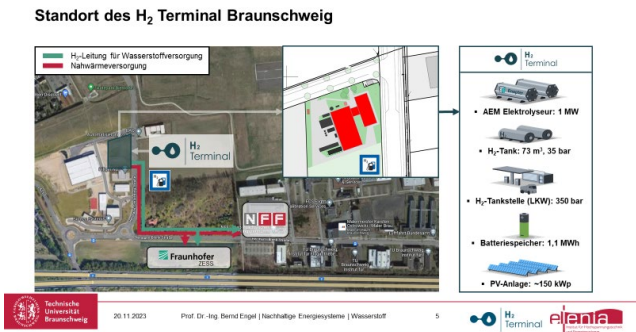
Wissenschaftskommunikation und Lehre - Erfassung von Forschungs- und realitätsnaher Messdaten



3 Wissenschaftskommunikation: Visualisierung der Prozessparameter mittels Dashboard



4 Integration in die Lehre



AGENDA

- Organisatorisches
- Auf dem Weg zum klimaneutralen Energiesystem
- Europäisches Verbundnetz und Spannungsebenen in DE
- Einblick in die Energiewirtschaft
- Projektvorstellung: H₂-Terminal Braunschweig
- **Erfahrungsbericht als Prosumer**



PV-Anlagen dezentral oder zentral?

10 kWp-Dachanlage zur Eigenversorgung im vorstädtischen Raum



- Vergütung nach **EEG** (neue Anlagen ca. 11ct/kWh)
- errichtet von **Privatpersonen**
- mit **Speicher** und **Energiemanagement**
- **Sektorenkopplung (Wärmepumpe und Elektromobilität)** möglich und immer mehr üblich
- speist bei KfW-Förderung nur 50 % der inst. PV-Leistung in **lastdominierte Niederspannungsnetze** (wg. Elektromobilität/Wärmepumpe)
- trägt zur lokalen Spannungshaltung und zur Frequenzhaltung bei
- kann in lastdominierten lokalen Netzen teilweise **Netzausbau verringern/verzögern**

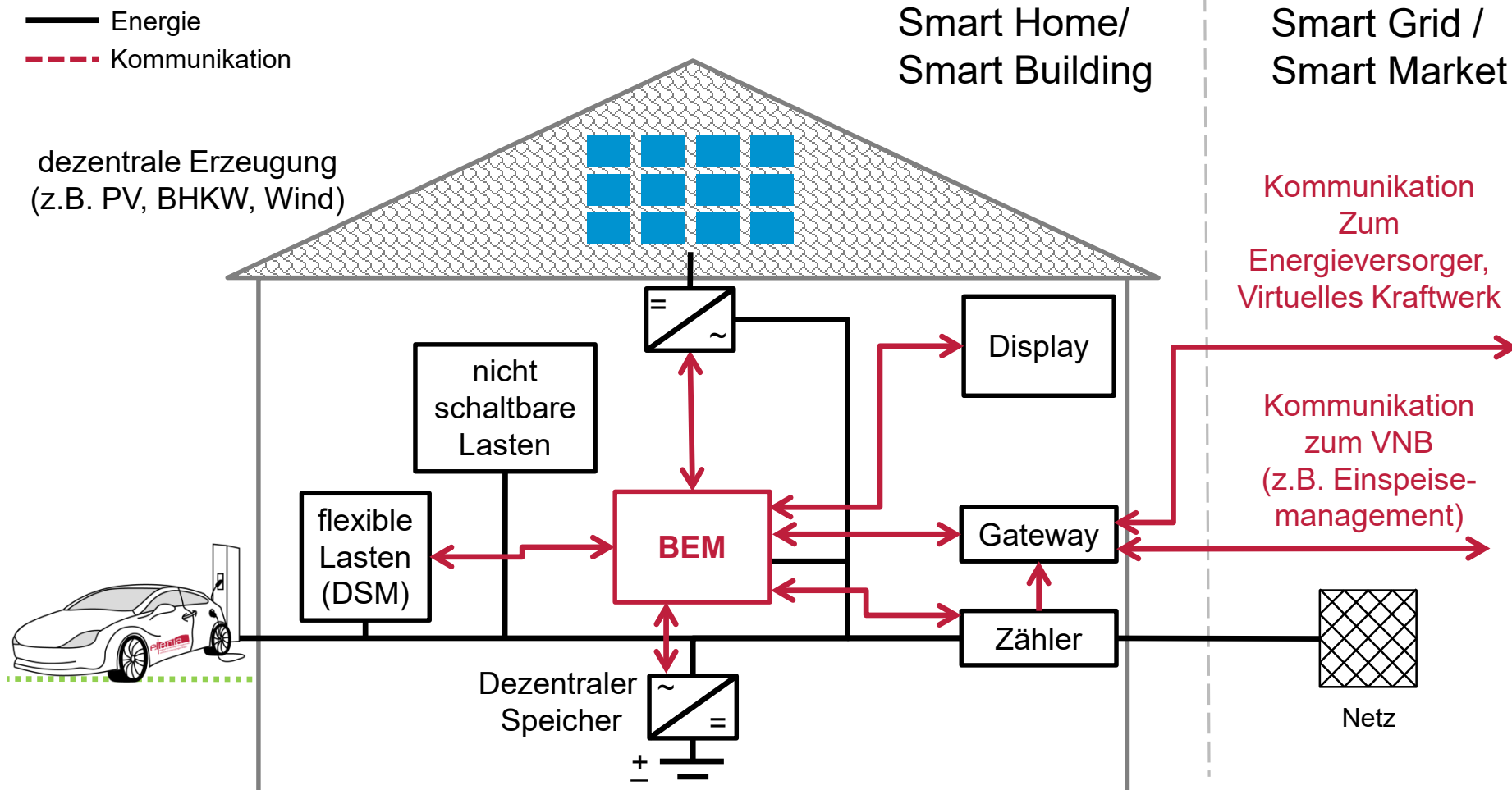
85 MW bis >1 GW – Solarkraftwerk in z. B. Brandenburg, Meck.-Vor.-Pom. mit **PPA**

<https://www.pv-magazine.de/2019/02/14/enbw-und-energiekontor-schliessen-15-jaehrigen-ppa-fuer-foerderfreien-solarpark-in-deutschland/>



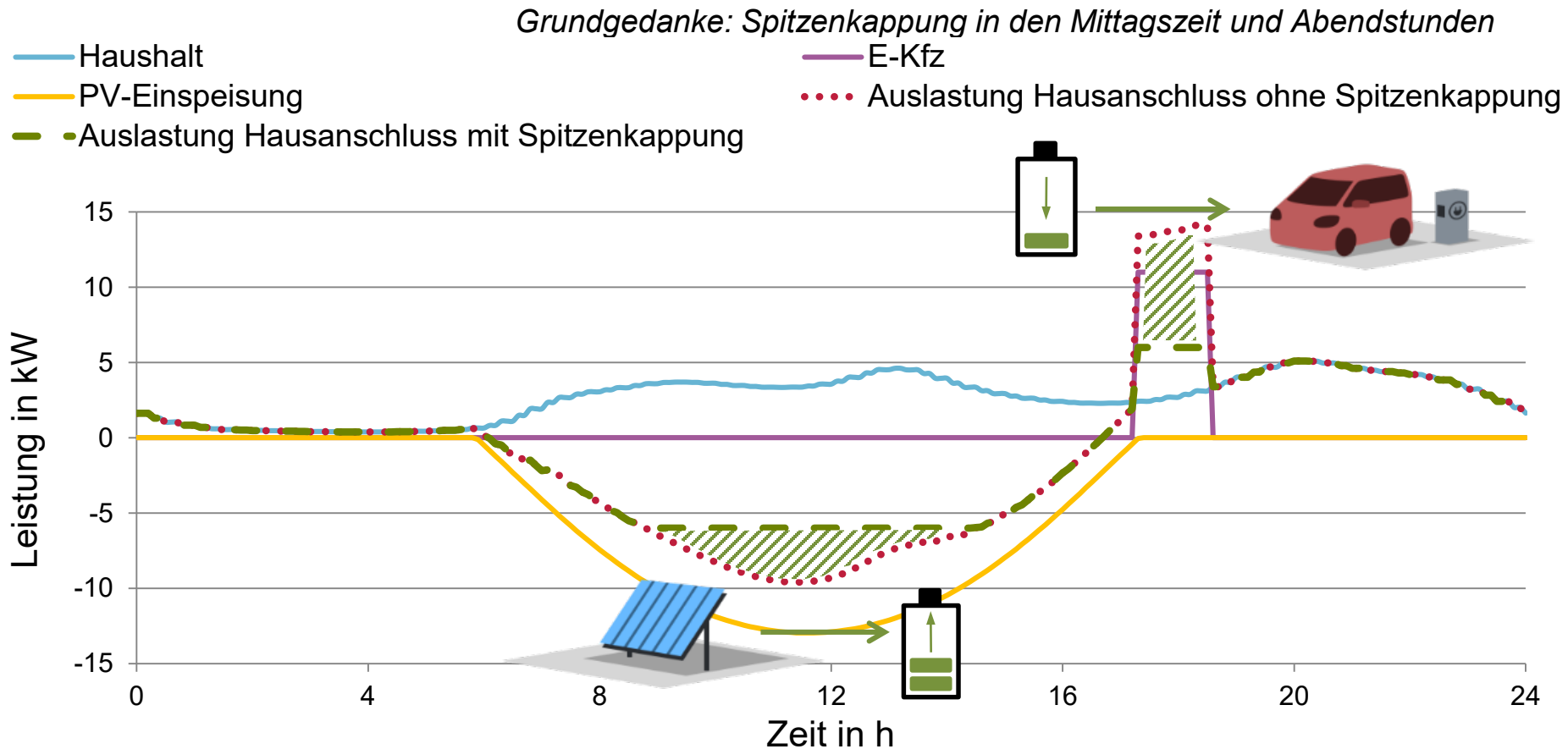
- Vergütung nach **PPA** (Power Purchasing Agreement) mit Energieversorgern außerhalb des EEG
- errichtet unter Beteiligung großer **Energiekonzerne**
- Normalerweise speist je nach Wechselrichter-dimensionierung bis zu 100 % der inst. PV-Leistung lastfern ein in **erzeugungsdominierte Höchst-/Hochspannungsnetze(-teile)** (zusätzlicher Netzausbau?, Erzeugungsmanagement?)
- weitergehende Anforderung an Spannungs- und Frequenzhaltung
- Bereitstellung **weiterer Systemdienstleistungen** (z.B. Regelleistung, Blindleistungsmanagement)

Smart Home/Smart Building mit Energiemanagement sind ein Bestandteil der Mobilitäts-/Energiewende (lokale Sektorenkopplung)



BEM : Building Energy Manager = Energiemanagement-System

Nutzung von PV-Speichersystemen



- Reduktion der Spitzen durch Speicherung von Energie aus PV-Anlage in der Mittagszeit und Laden des Elektrofahrzeugs in den Abendstunden aus dem Speicher
- PV-Anlage alleine als Maßnahme nicht ausreichend, weil die Spitzen zu unterschiedlichen Zeitpunkten sind

Prosumer: aus der PV-Anlage wird das e-Kfz und die Wärmepumpe gespeist

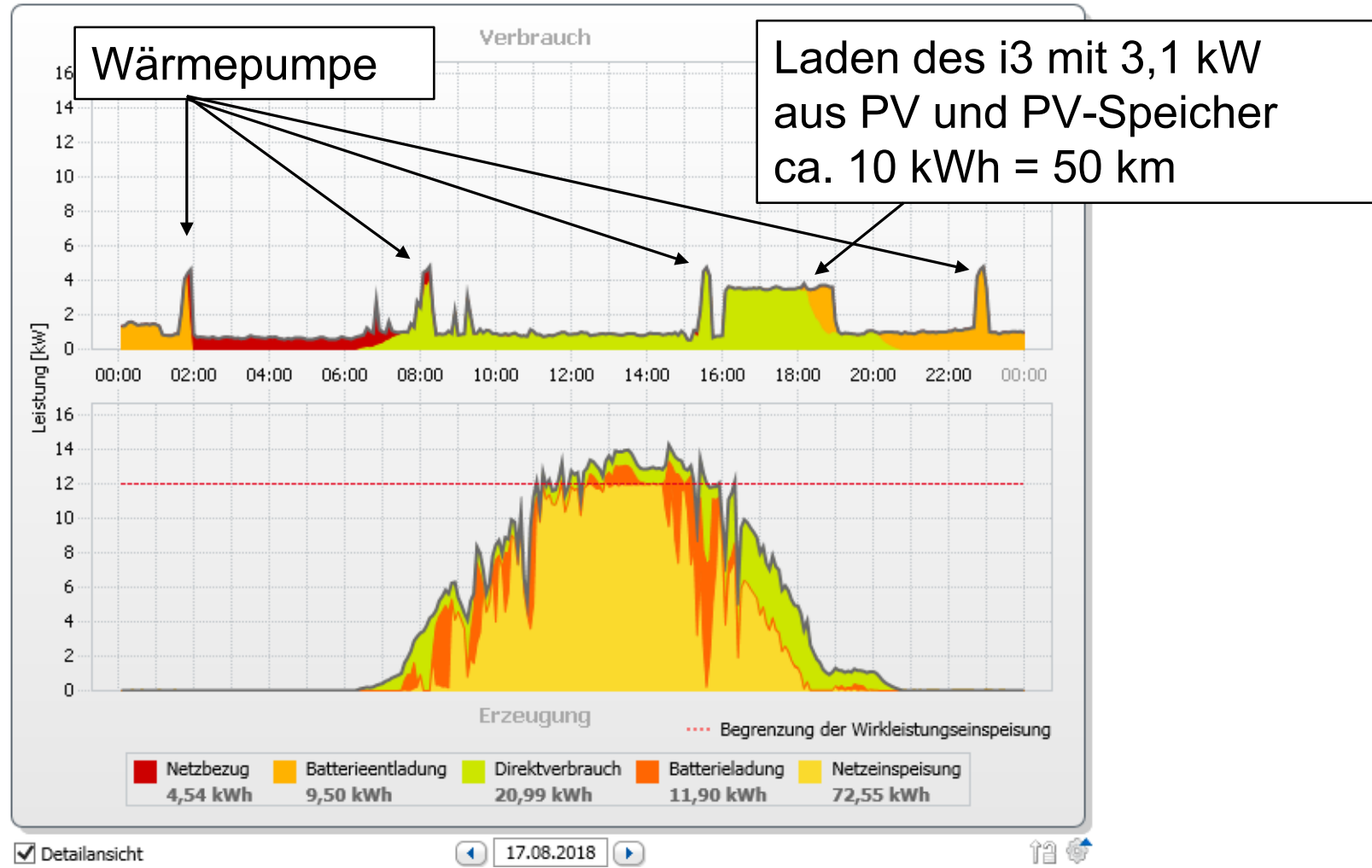
Trotz Sektorenkopplung mit Wärme- und Verkehrsbereich ist ein all-electric Energieplus-Haus möglich

Prosumer-Anlage Familie Engel:

- **20 kWp PV** installiert (> 20 MWh Ertrag/a)
- **Batterie 18 kWh** mit 18 kW **netzbildenden Batteriewechselrichter** für Backup
- Haus mit **KfW-EnEff 40+-Standard** (**60 % netzdienliche Einspeisebegrenzung am NAP**)
- **Sole-Wärmepumpe** (3 Bohrungen 90 m tief) – **EE-Strom zu Wärme**
- **BMW i3 e-Kfz** – **EE-Strom zu Mobilität**
- **Netzeinspeisung 2018: 15,9 MWh**
- **Netzbezug 2018: 6,8 MWh**
- **Stromversorger** für Reststrom: BS Energy Naturstrom Gold mit Zertifikat "Grüner Strom Label"



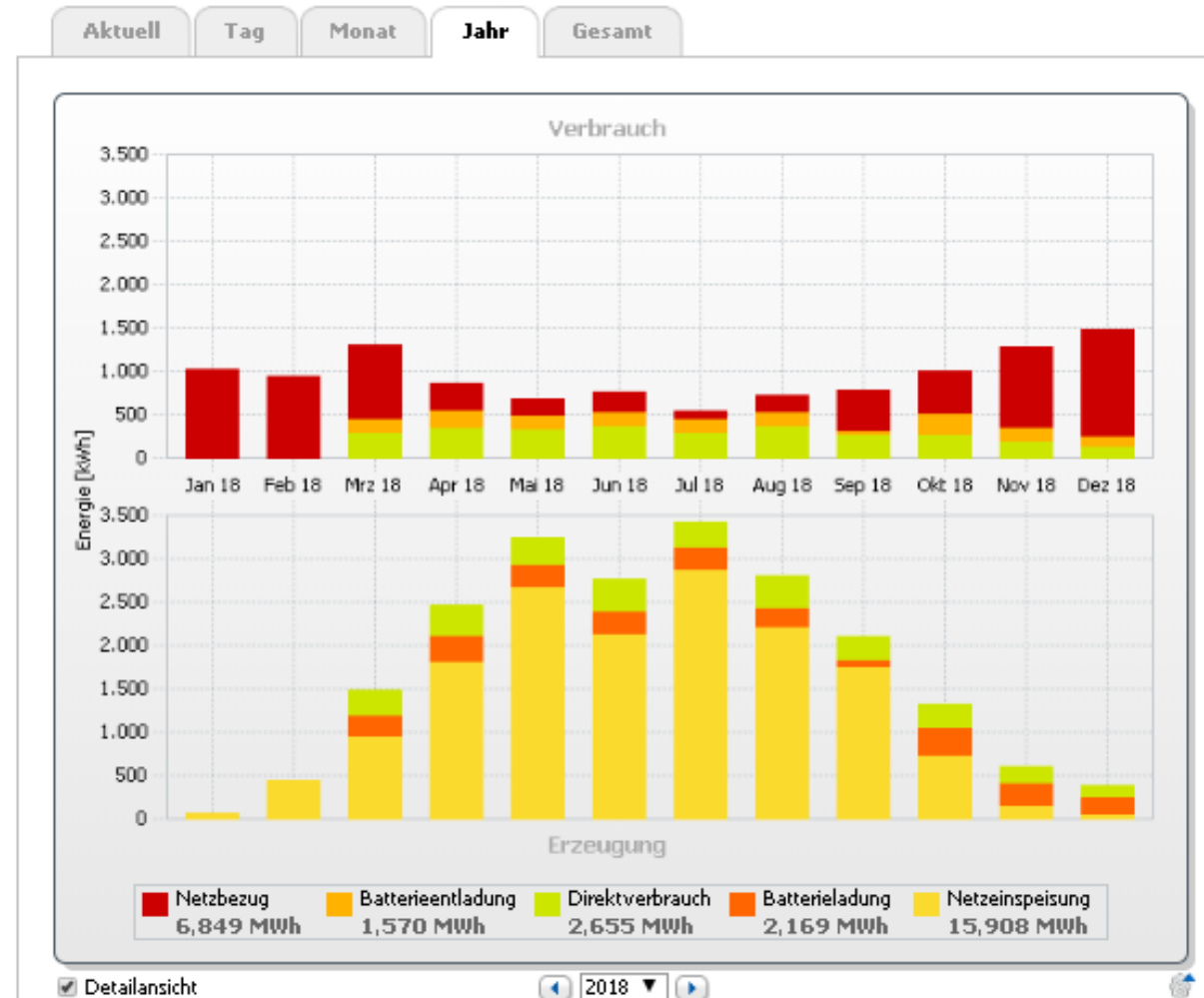
Aus PV-Energie wird mit Unterstützung des Speichersystems das Elektrofahrzeug und die Wärmepumpe gespeist



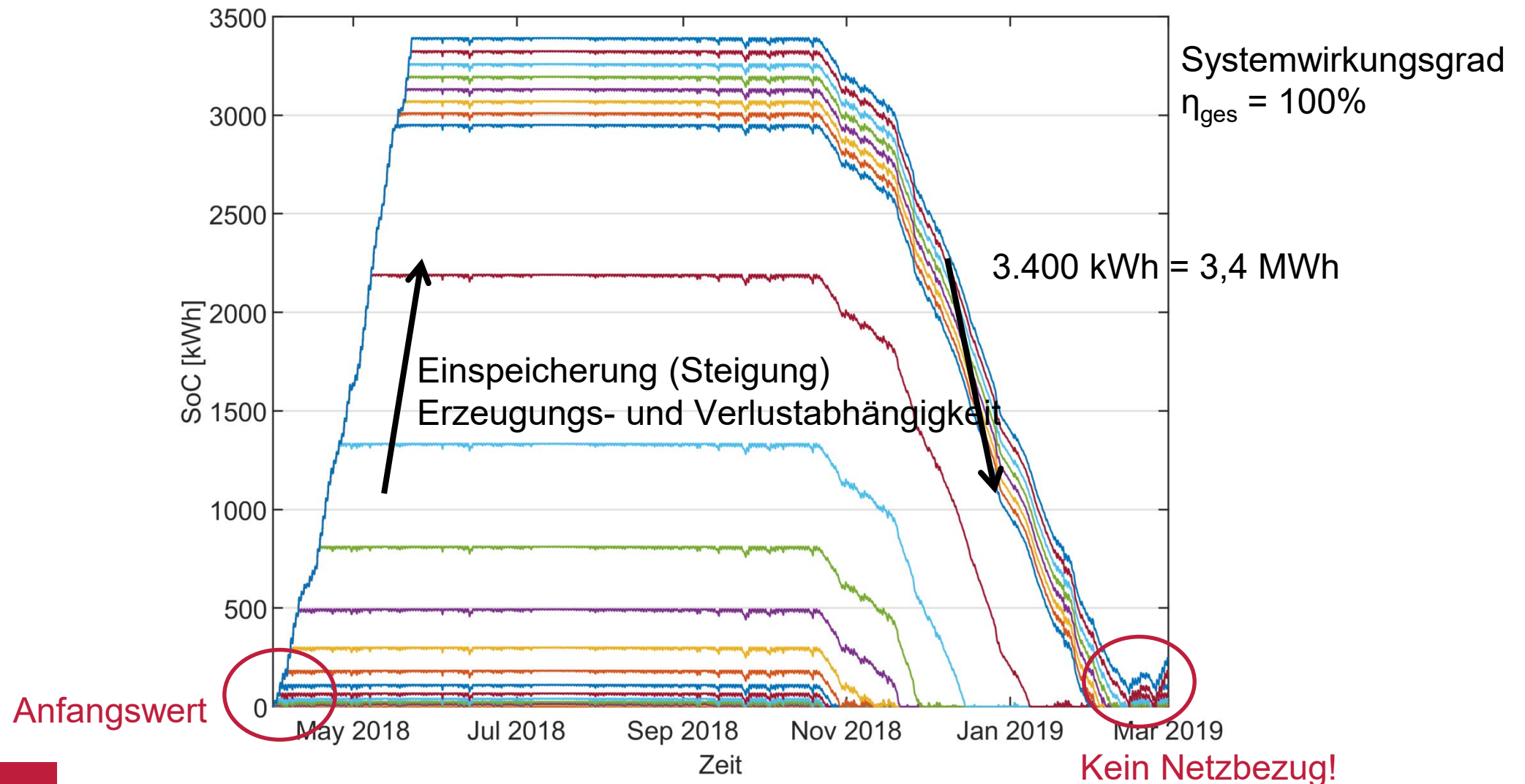
Leider korrespondieren PV und Last in einem all-electric-Haus mit Wärmepumpe und Elektroauto nicht sehr gut!

Rahmenbedingungen:

- 2018: Zweitheißester Sommer seit Beginn der Wetteraufzeichnung
- Milde Wintermonate
- 12,5° Dachneigung (nicht optimal)



Speichergröße - Auslegung



Abschätzung nach Korrekturen mit Verlusten etc. : 5,6 MWh Batteriespeicher für 100 % Autarkiequote

Überschlägt man jetzt die Effekte durch:

- das gute Sonnenjahr 2018 (+11 %)
 - Speicherverluste (Batteriewechselrichter-Verluste, Selbstentladung) Für erzeugungsschwache bzw. verbrauchsstarke Jahre muss eine Sicherheit im Speicher vorgehalten werden
 - dem milden Winter 2018/2019 (+12 % auf abgeschätzte Heizenergie von 4000 kWh)
 - Wirkungsgrad von 90 % PV->BAT und PV->AC und 96 % für den Anteil der Batterie
https://www.sma.de/fileadmin/Partner/SMA_Partnerprogramm/SMA_Regional-Treff_2018/09_Speicher_Effizienzleitfaden.ext.pdf
 - eine Selbstentladung angenommen für im Mittel drei Monate von 4 % im Monat (also in Summe etwa 12,5 %)
<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4414.pdf>
- Damit errechnet sich überschlägig **eine notwendige Speichergröße**
– **ohne Komforteinbußen – bei vollkommener Autarkie von etwa 5.600 kWh**
(=5,6 MWh), um mit einer 20 kWp-Anlage für einen Einfamilienhaushalt über den Winter zu kommen.

Das ist mehr als die Hälfte des WEMAG-Speichers mit 10 MWh.

10 MWh Batteriespeicher Schwerin Lankow



Investition: 6,7 Mio. €

Rudolph-Kramer
<https://www.wemag.com/aktuelles-presse/blog/wemag-speicher-zeigt-schwarzstartfaehigkeit>



Nur mal eben für zuhause...

Rudolph-Kramer; <https://www.wemag.com/aktuelles-presse/blog/wemag-speicher-zeigt-schwarzstartfaehigkeit>