

Universität Stuttgart
Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik



**Eine sichere Strom-
versorgung für die
Zukunft – (wie) geht das?**

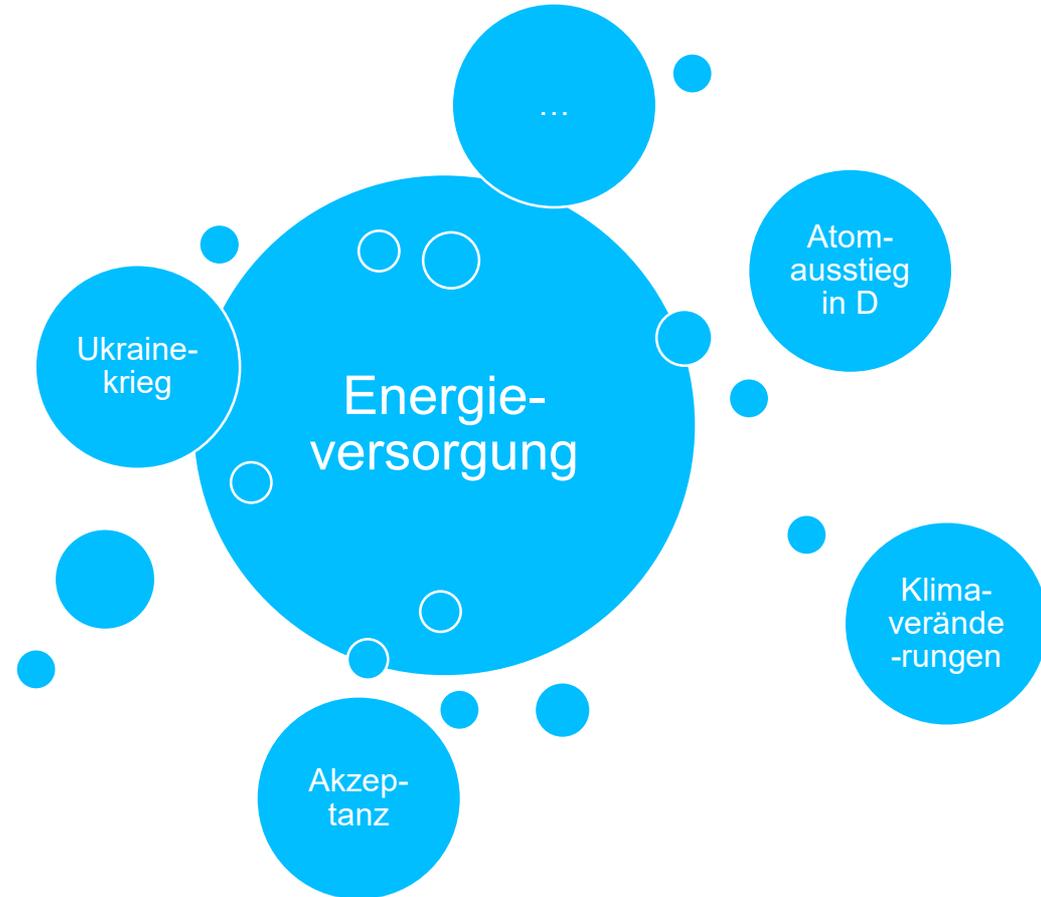
**Risiken, Hürden und
Lösungsansätze**

Prof. Dr.-Ing. Hendrik Lens

Vortrag an der VHS Stuttgart am 18.04.2023

Vorbemerkungen

- Energieversorgung
 - derzeit im Fokus der Öffentlichkeit
 - kontrovers diskutiert
 - Viele Dimensionen: technisch, politisch, wirtschaftlich, gesellschaftlich, ...
- Stromversorgung
 - ist nur ein Teil des gesamten Energiesystems,
 - wird zunehmend wichtiger, da viele Sektoren wie Verkehr und Wärme zunehmend elektrifiziert werden.



Erwartungsmanagement

Fragen, die ich nicht beantworten werde / kann

- Lohnt sich der Kauf einer PV-Anlage / Wärmepumpe / Batterie / ...?
- Werden wir genug Fachkräfte haben, um die Energiewende zu stemmen?
- Wird es nächsten Winter Engpässe geben?
- Wie teuer wird der Strom in 1, 5, 25 Jahren sein?



Bildquelle: <https://www.flickr.com/photos/149561324@N03/25203514078/>

Zeit für Interaktion

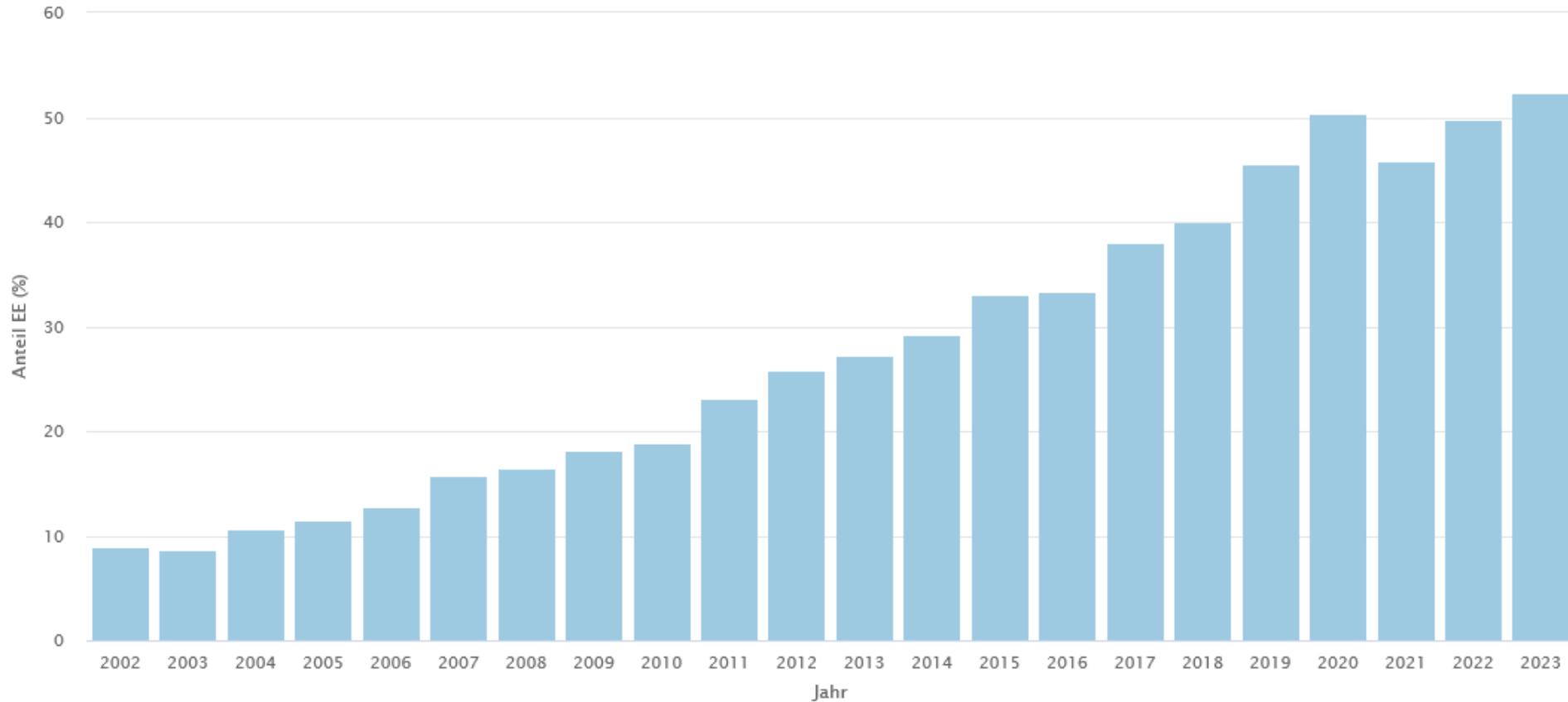
- Besuchen Sie www.menti.com
- Geben Sie den folgenden Code ein: 3413 4457
- Oder verwenden Sie den QR-Code:



Wo stehen wir heute?

Wo stehen wir heute?

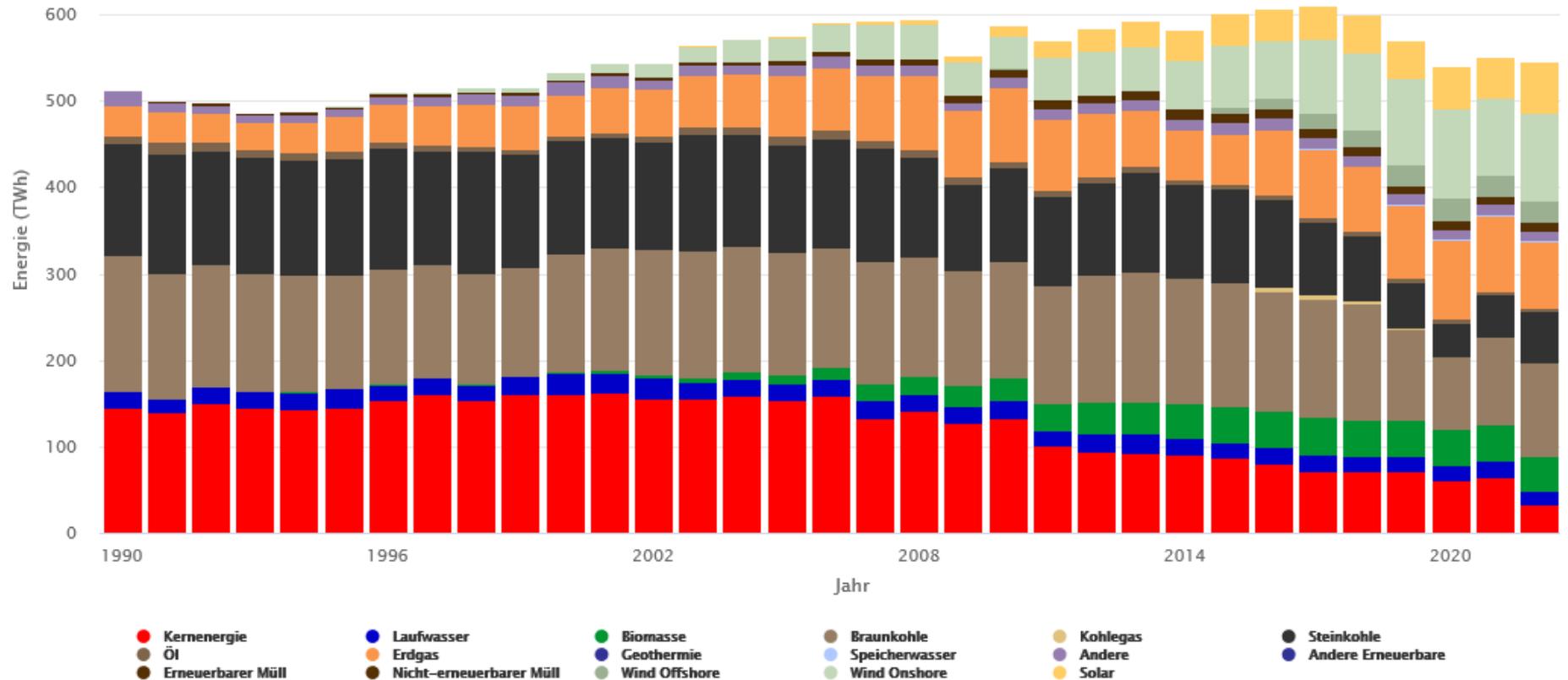
Jährlicher Anteil Erneuerbarer Energien an der öffentlichen Stromerzeugung in D



Quelle: www.energy-charts.info

Wo stehen wir heute?

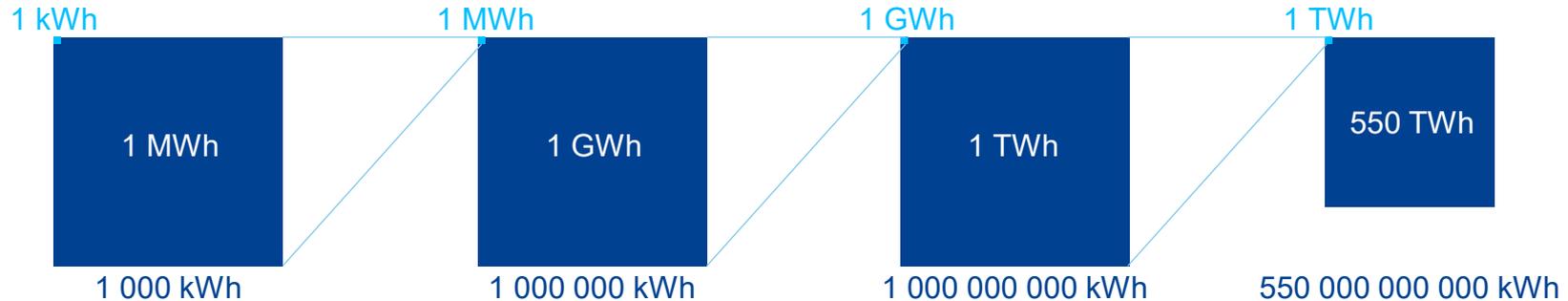
Gesamte Nettostromerzeugung in Deutschland (energetisch korrigiert)



Quelle: www.energy-charts.info

Exkurs 1: Größenordnungen

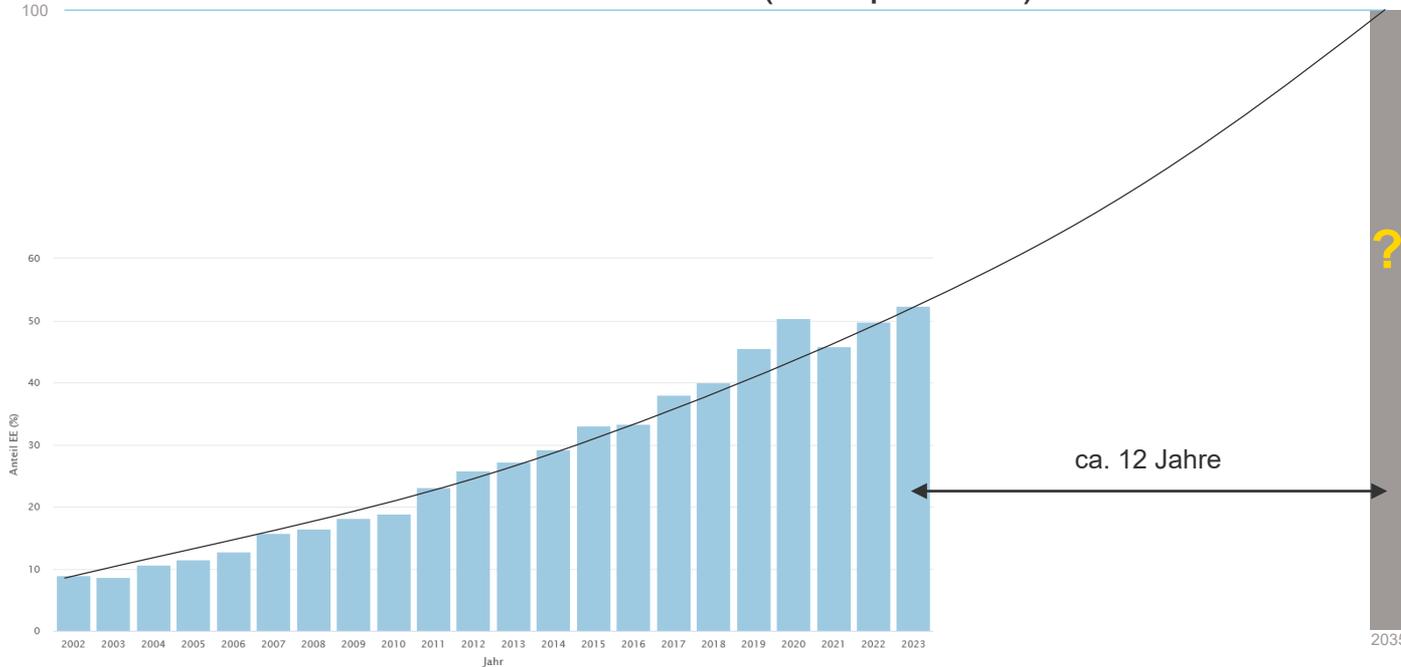
Was ist eine TWh (Terrawattstunde)?



- 1 kWh: ca. 10 Liter Wasser zum Kochen bringen
- 3,2 MWh: Durchschnittlicher Jahresverbrauch eines Privathaushalts
- 1,3 GWh: Elektrische Energie, die das AKW Neckarwestheim 2 bei Vollast in einer Stunde in das Netz speiste
- 2,5 TWh: Jahresverbrauch einer Aluminiumhütte (Trimet, Standort Essen)

Wo stehen wir (über)morgen?

- Können wir den Trend fortschreiben (extrapolieren)?



Quelle: www.energy-charts.info, mit eigener Ergänzung

Nein! Es gibt weitere Randbedingungen zu beachten → Herausforderungen

**Herausforderung:
Ausgeglichene
Leistungsbilanz**

Exkurs 2: Unterschied zwischen Leistung und Energie

ENERGIE

- 1 kWh: ca. 10 Liter Wasser zum Kochen bringen
- Zur Erinnerung: Stromverbrauch in Deutschland liegt bei ca.
550 TWh = 550 000 GWh
- Würde Deutschland rund um die Uhr die gleiche Leistung benötigen, wäre dies ca.
 $550\,000\text{ GWh} / 8760\text{ h} = \mathbf{63\ GW}$

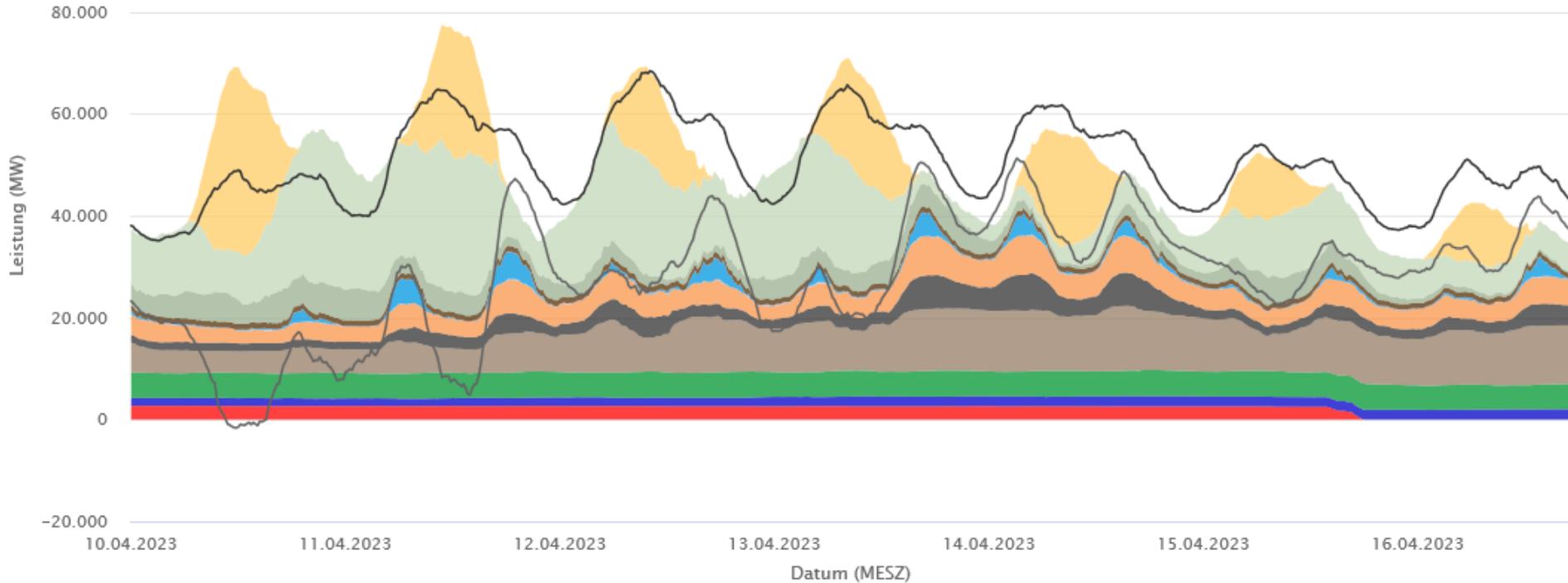
LEISTUNG

- 2,2 kW: Leistung des Wasserkochers
- Wenn dieser Wasserkocher 30 min läuft, verbraucht er 1,1 kWh
- Maximale Leistung des Verbrauchs in Deutschland (Starklast) liegt bei ca.
80 GW = 80 000 MW = 80 000 000 kW →
rein rechnerisch ca. 1 kW pro Einwohner

Die benötigte Leistung verändert sich über die Zeit!

Leistungen Kalenderwoche 15/2023

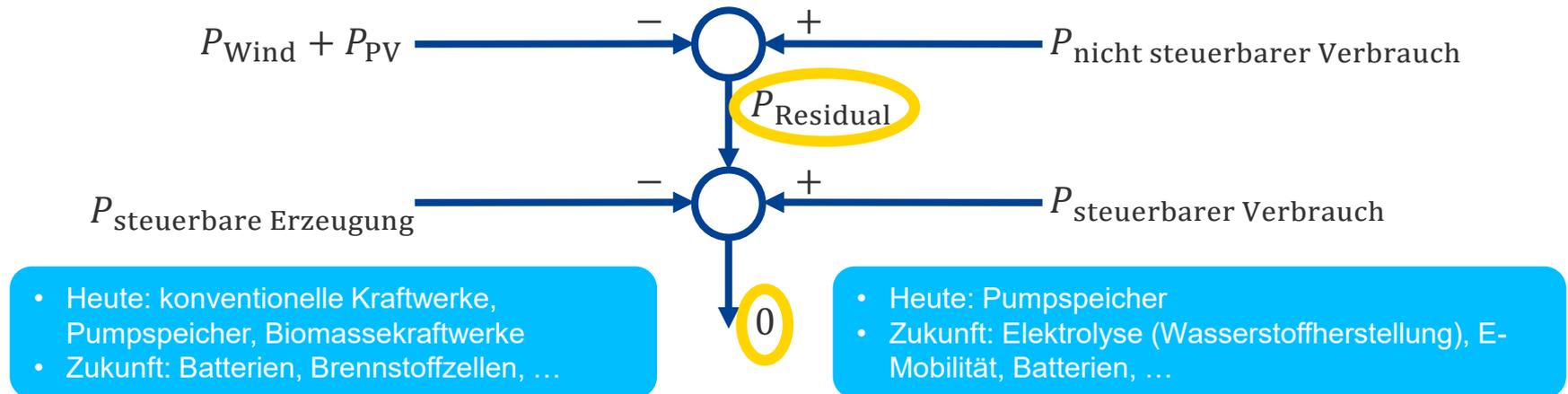
Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland



- Kernenergie
- Laufwasser
- Biomasse
- Braunkohle
- Steinkohle
- Öl
- Erdgas
- Geothermie
- Speicherwasser
- Pumpspeicher
- Andere
- Müll
- Wind Offshore
- Wind Onshore
- Solar
- Last
- Residuallast

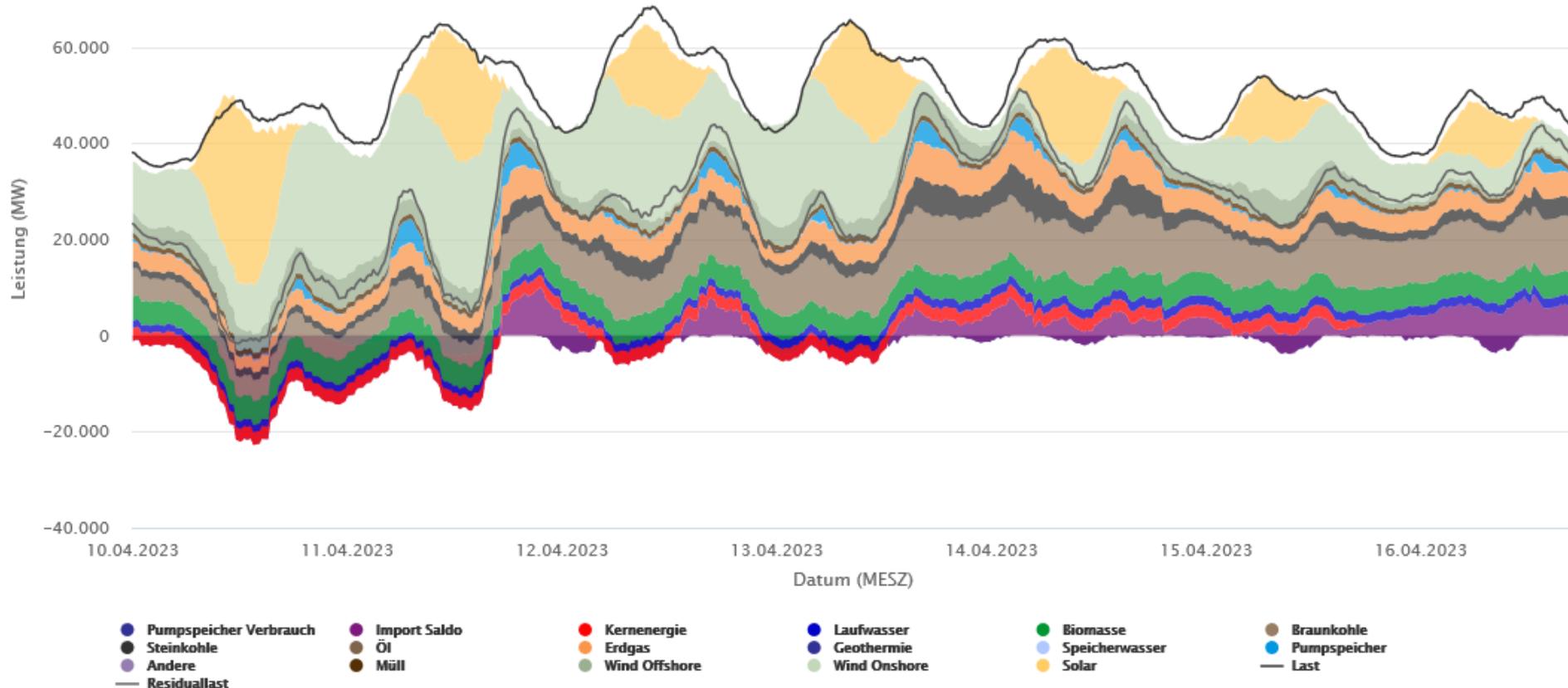
Was ist die Residuallast und warum ist eine ausgeglichene Leistungsbilanz notwendig?

- Das Netz selbst hat so gut wie keine Speicherkapazität. Wenn die Bilanz nicht ausgeglichen ist, bricht der Netzbetrieb zusammen (→ nächste Herausforderung).
- Erzeuger, Verbraucher (und Speicher) müssen über **Gesamteuropa** eine ausgeglichene Leistungsbilanz erreichen.
- Der Strommarkt soll dies sicherstellen, aber dafür sind **ausreichend steuerbare Kapazitäten** notwendig.



Leistungen Kalenderwoche 15/2023

Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland mit Import und Pumpspeichern



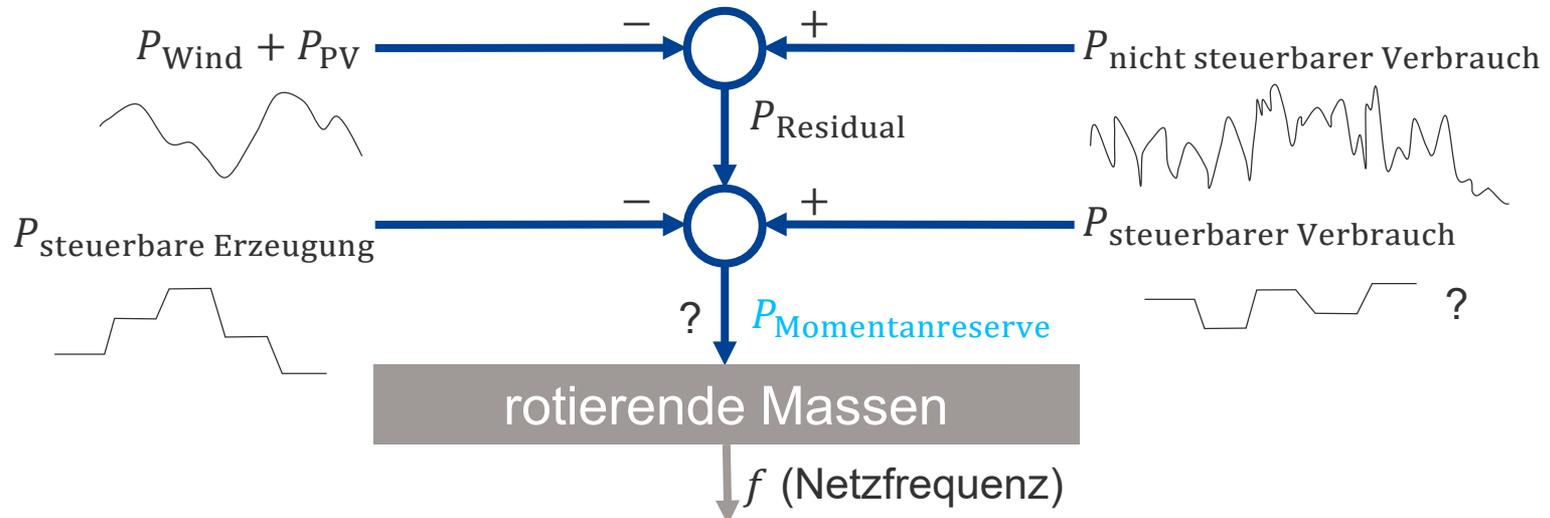
Lösungsansätze

- Wir müssen EE ausbauen. Wir müssen EE ausbauen. **Wir müssen EE ausbauen.**
- Das reicht jedoch nicht:
 - EE müssen so steuerbar wie möglich sein – zur Not auch abgeregelt werden
 - Flexibilisierung der Biomasse notwendig
 - Speicherbedarf steigt
 - Batterien und Elektrolyse in Verbindung mit Wasserstoffspeicher
 - Paradigmenwechsel: Verbraucher mit expliziter oder impliziter Speicherkapazität sollten für einen Beitrag zum Ausgleich der Leistungsbilanz herangezogen werden
 - Elektrolyse
 - E-Mobilität („intelligentes Laden“)
 - Wärmepumpen (zeitlich begrenzt)
- Wir werden weiterhin Kraftwerke benötigen:
 - wenige Betriebsstunden → Gaskraftwerke (Investitionsanreize?)
 - perspektivisch mit Wasserstoff betrieben

**Herausforderung:
Ausgeglichene
Leistungsbilanz in jedem
Moment**

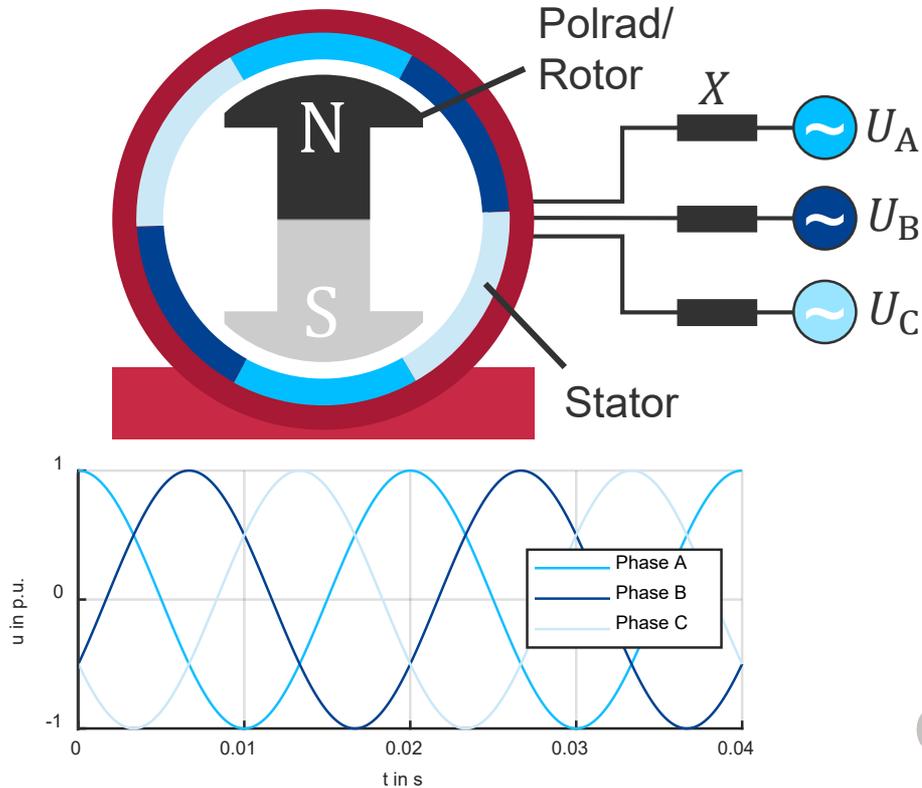
Reicht das bereits, oder „Woher weiß das Kraftwerk, dass ich den Wasserkocher anschalte“?

- Die Ergebnisse des Strommarkts basieren auf Prognosen für Wind, PV und Verbrauch
- Prognosen sind in der Realität nie exakt. Fehler in der Leistungsbilanz sind also unvermeidbar und treten fortwährend auf.
- Ausgleich durch **Momentanreserve** aus rotierenden Massen (**Trägheit** des Systems)
- Intrinsische Eigenschaft des Synchrongenerators – er kann gar nicht anders! (Physik)



Rotierende Massen

Die zentrale Rolle des Synchrongenerators



Turbosatz des Kraftwerks Boxberg



Zusammenhang zwischen Netzfrequenz und Leistungsgleichgewicht

Analogie 1: Tandem



$$P_{\text{Erzeuger}} = P_{\text{Verbraucher}}$$

Leistungsgleichgewicht und Frequenzgleichgewicht

→ **Frequenz bleibt konstant** ($f_{\text{Soll}} = 50 \text{ Hz}$)



$$P_{\text{Erzeuger}} < P_{\text{Verbraucher}}$$

Erzeugerausfall / Verbraucherzuschaltung

→ Ausspeicherung von Energie aus den rotierenden Massen

→ **Frequenz fällt**



$$P_{\text{Erzeuger}} > P_{\text{Verbraucher}}$$

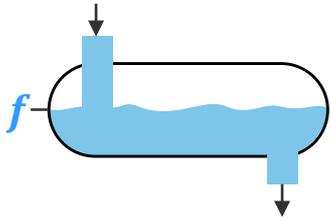
Erzeugerzuschaltung / Verbraucherausfall

→ Einspeicherung von Energie in die rotierenden Massen

→ **Frequenz steigt**

Zusammenhang zwischen Netzfrequenz und Leistungsgleichgewicht

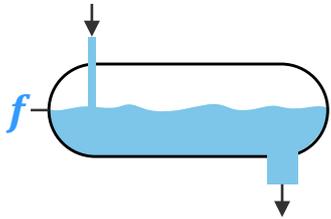
Analogie 2: Wasserbehälter



$$P_{\text{Erzeuger}} = P_{\text{Verbraucher}}$$

Leistungsgleichgewicht und Frequenzgleichgewicht

→ **Frequenz bleibt konstant** ($f_{\text{Soll}} = 50 \text{ Hz}$)

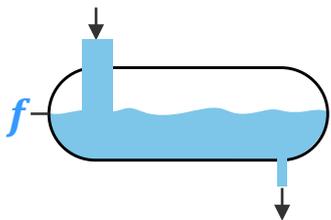


$$P_{\text{Erzeuger}} < P_{\text{Verbraucher}}$$

Erzeugerausfall / Verbraucherzuschaltung

→ Ausspeicherung von Energie aus den rotierenden Massen

→ **Frequenz fällt**



$$P_{\text{Erzeuger}} > P_{\text{Verbraucher}}$$

Erzeugerschaltung / Verbraucherausfall

→ Einspeicherung von Energie in die rotierenden Massen

→ **Frequenz steigt**

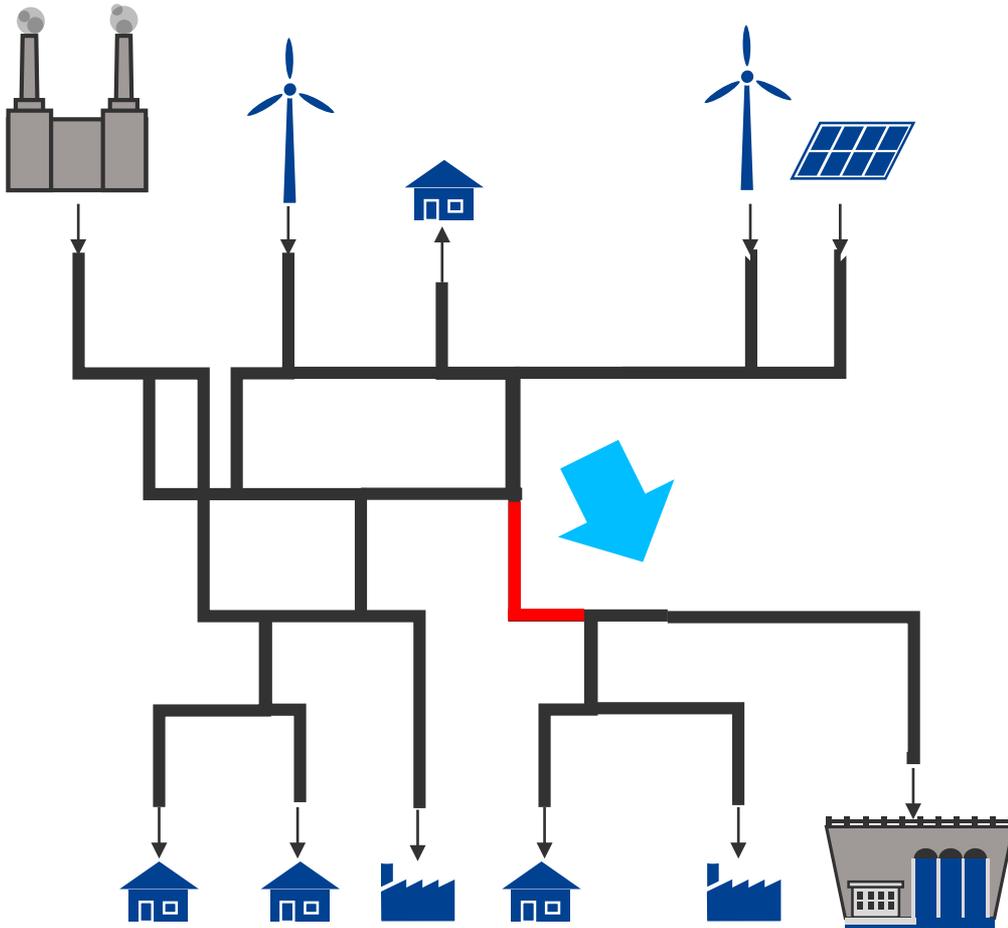
**Je kleiner das
„Wasserbecken“,
desto schneller die
Frequenzänderung.**

Lösungsansätze

- Zwangsbetrieb von Kraftwerken mit Synchrongeneratoren (heute Lösung in Irland)
- Zu Zeiten mit sehr hohem EE-Anteil profitiert Deutschland heute von Schwungmasse im Ausland
- Mittel- bis langfristig brauchen wir **Momentanreserve aus Batterien und EE**
→ erforscht und technisch möglich
- Es gibt jedoch noch keine Verpflichtung bzw. keinen Anreiz (Mehrkosten), entsprechend wenig Betriebserfahrung
- Änderungen sind auf dem Weg, allerdings brauchen diese Zeit
- Aktuelle Studie zum Bedarf an Momentanreserve und zur marktgestützten Beschaffung (richtet sich allerdings eher an Fachleute):
https://www.amprion.net/Dokumente/Transparenz/Studien-und-Stellungnahmen/2023/Marktgest%C3%BCtzte_Beschaffung_Momentanreserve.pdf

**Herausforderung:
Leistungstransport von
Erzeugung zu Verbrauch**

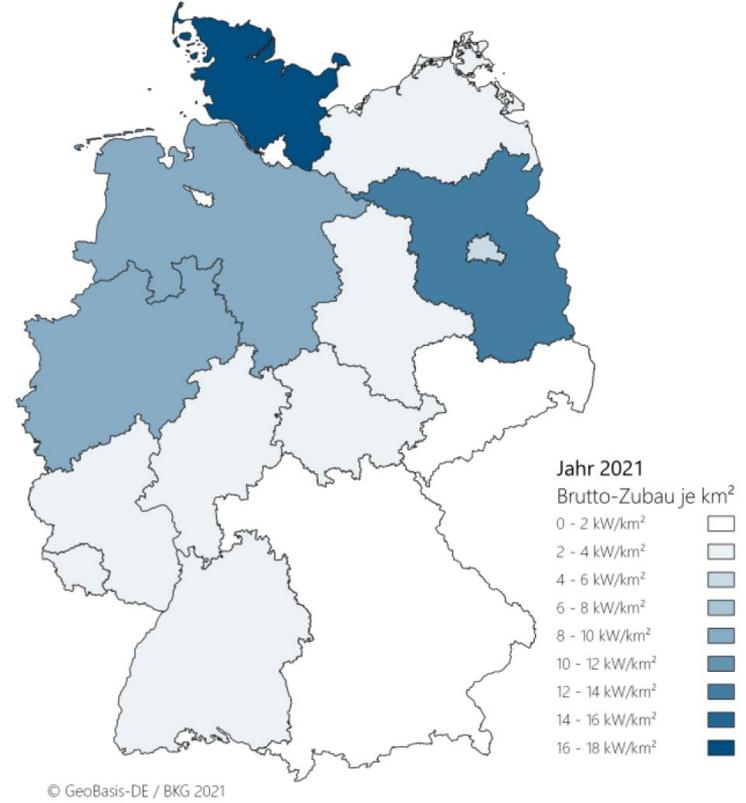
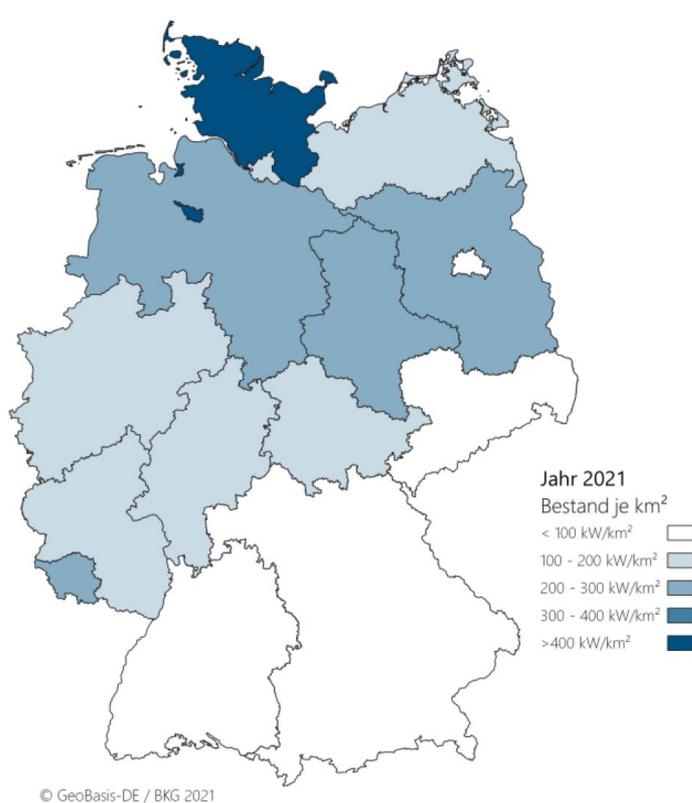
Leistungstransport



- Leistungsfluss ergibt sich aus Ein-/Auspeisungen und Leitungsparametern
- Verteilung auf Leitungen nur sehr begrenzt steuerbar. „Weg des geringsten Widerstands“
- Analogie (mit begrenzter Gültigkeit): gekoppelte Wasserrohre mit unterschiedlichen Längen und Querschnitten
- Bei hohem Leistungstransport können die maximalen Übertragungskapazitäten überschritten werden → Engpass

Geographische Verteilung der EE-Erzeugung

Installierte Leistung und Zubau Windkraft 2021



Regionale Verteilung der kumulierten Leistung

Quelle: WindGuard– Stand: 31.12.2021

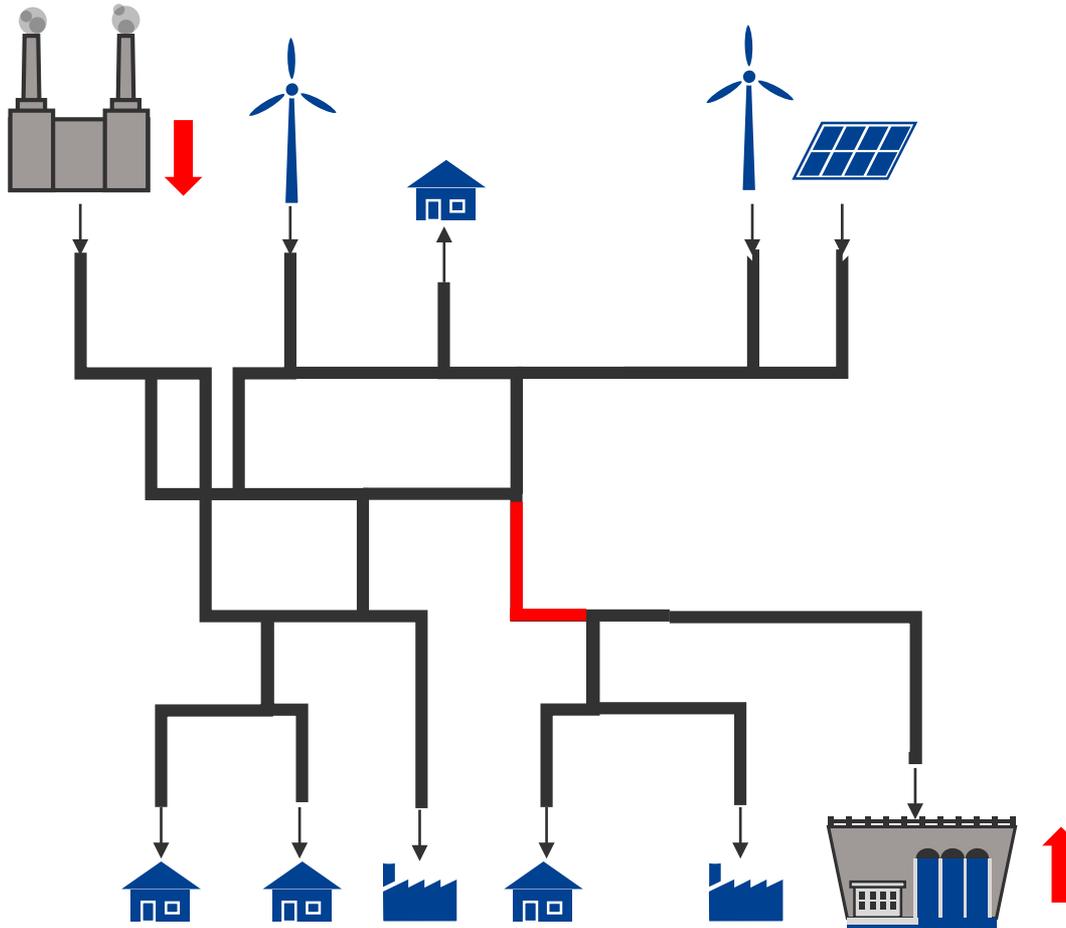
Regionale Verteilung des Brutto-Zubaus

Engpassmanagement

- Einheitliche Preiszone im innerdeutschen Strommarkt
- Keine Anreize zur Berücksichtigung von Netzengpässen bei der Kraftwerkseinsatzplanung
- Engpassbeseitigung erfolgt durch Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB)

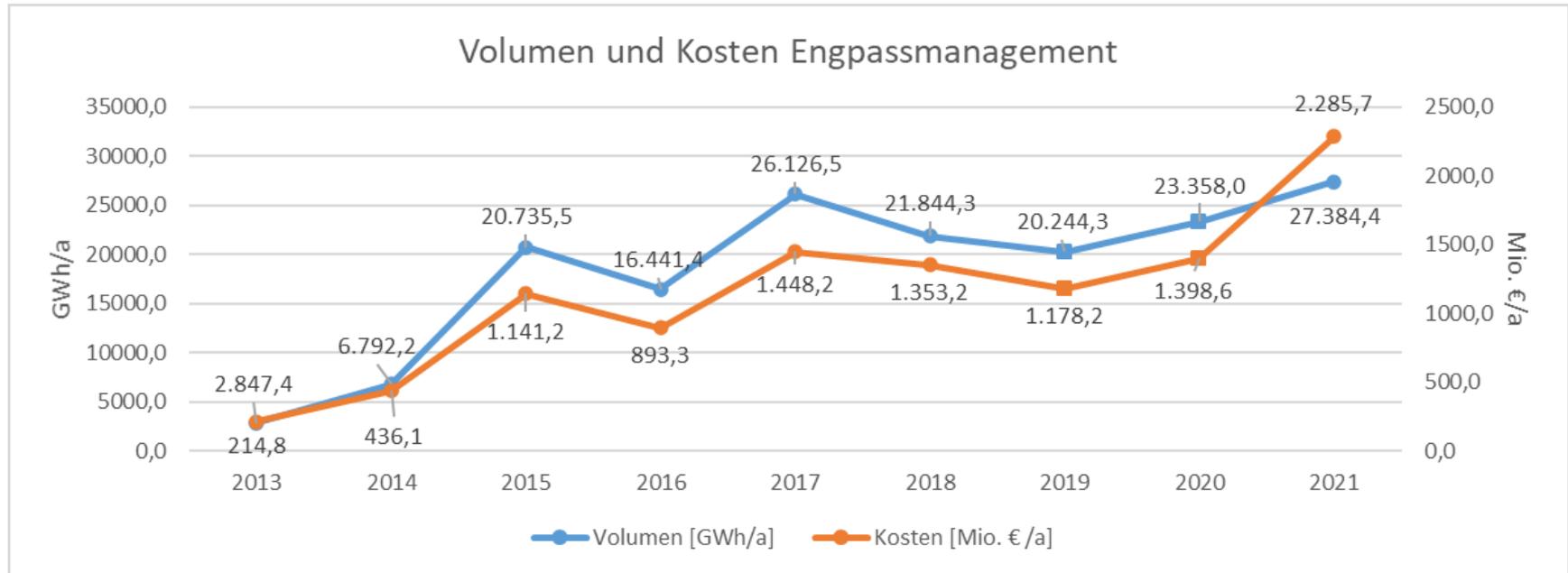


Redispatch



- Vereinfacht: Absenkung der Erzeugung im Norden und Erhöhung im Süden entlastet das Netz.
- Nachteile:
 - Eingriff in den Markt (→ Kosten)
 - Auch bei viel EE im Norden müssen steuerbare KW im Süden hochgefahren werden.
 - Ggf. muss sogar EE im Norden abgeregelt werden.

Zeitliche Entwicklung



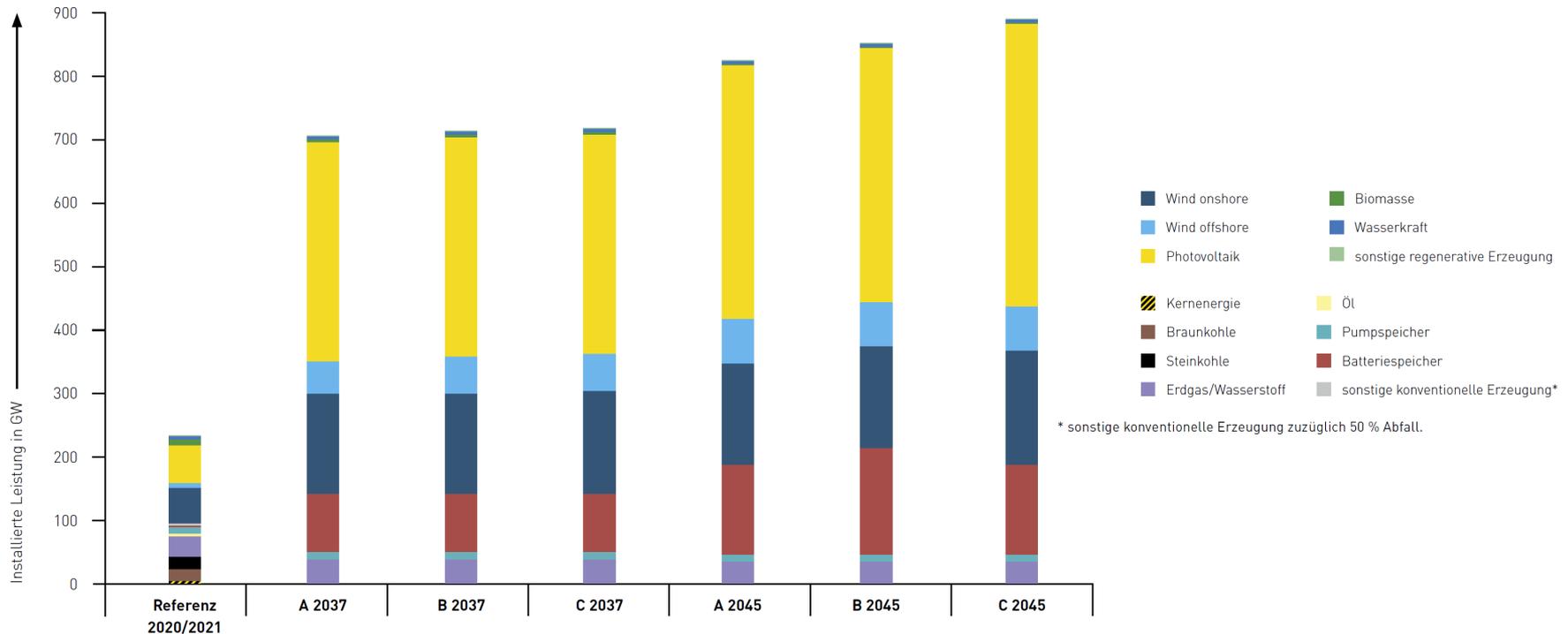
Quelle: BDEW auf Basis von Daten der Bundesnetzagentur

Lösungsansätze

- Um in Zukunft massive Abregelungen von EE zu vermeiden, ist entsprechender **Netzausbau** notwendig.
 - Interessenskonflikt: Übertragungsnetzbetreiber haben natürliches Monopol.
 - Deshalb: Netzentwicklungsplan (NEP) als gesetzlich festgelegter Bedarfsermittlungsprozess.
 - Muss konsultiert und von der Bundesnetzagentur genehmigt werden, bevor hieraus Netzausbauprojekte entstehen.
 - NEP betrachtet auch Stabilität und weitere Kriterien
 - Momentan läuft die Konsultation des ersten Entwurfs zum NEP 2037/2045 (<https://www.netzentwicklungsplan.de/>)
- **Beteiligung von kleinen Anlagen** („Redispatch 2.0“) am Redispatch → hoher administrativer und kommunikativer Aufwand
- Versuch zur **Beteiligung der Bevölkerung**: Aufrufe von TransnetBW über die App „StromGedacht“ zur Verringerung des Stromverbrauchs in Zeiten mit hohem Redispatchbedarf → geringere Kosten → reduziert Einfluss des Redispatch auf Netzentgelte (<https://www.stromgedacht.de/>)
- Hier ausgeklammert, aber auch wichtig: Verteilnetzausbau

Szenariorahmen des Netzentwicklungsplans 2037

Von der Bundesnetzagentur im Juli 2022 genehmigt



Quelle: Netzentwicklungsplan 2037/2045, Version 2023, 1. Entwurf, März 2023

Zusammenfassung und Fazit

Zusammenfassung

- Fokus lag auf technische Herausforderungen der Stromversorgung:
 - Ausgeglichene Leistungsbilanz
 - Leistungstransport von Erzeugung zu Verbrauch
- Weitere, wichtige Aspekte
 - Effizienz
 - Kopplung zu anderen Sektoren
 - Gesetzlicher Rahmen
 - Kosten / Investitionen
 - gesellschaftliche Akzeptanz
 - Wettbewerb
 - Fachkräfte
 - ...

Schlussbemerkungen

- Wir dürfen nicht nur an vergleichsweise kurzfristige Nachteile denken. Es geht um nachfolgende Generationen!
- Der Wandel wird teuer. Nichts zu machen, wird sehr wahrscheinlich noch teurer. Sogar ohne Klimawandel-Kosten: Preisexplosion für neue Kernkraftwerke, Gaspreis, ...
- Gleichzeitig müssen wir den Wandel so gestalten, dass er gelingt:
 - Wir haben hohen Zeitdruck, dürfen aber Privathaushalte und Wirtschaft nicht überfordern (sowohl bzgl. der Umstellung als auch bzgl. der Kosten), so dass wir das richtige Tempo wählen müssen. Eine gerechte gesellschaftliche Verteilung der Belastung ist wichtig.
- „Was kann Deutschland schon ausrichten, wenn der Rest der Welt nicht mitmacht?“
 - Nicht viel. Aber: Auch im Rest der Welt passiert viel und wir haben die Möglichkeit, uns technologisch auf die Zukunft einzustellen. Dies bedeutet nicht, dass wir alles besser wissen/machen, aber nichts machen ist keine Option.

Fazit

- Egal, wie Ihre persönliche Meinung zu dem Thema ist: **Energieversorgung ist ein wichtiges Thema**, fast alles hängt davon ab. Wir brauchen qualifizierte Fachkräfte, denn das Themengebiet ist komplex!
 - Beschäftigen Sie sich mit dem Thema und motivieren Sie andere, dies zu tun.
 - Motivieren Sie Schulabsolventen zu entsprechenden Ausbildungen und Studiengängen, z.B. *B.Sc. Erneuerbare Energien* an der Universität Stuttgart
<https://www.uni-stuttgart.de/studium/bachelor/erneuerbare-energien-b.sc/>
- Weitere Informationen
 - Positionspapier und Hintergrundpapiere aus der Energietechnischen Gesellschaft (ETG) des VDE, an denen ich mitgewirkt habe:
<https://www.vde.com/de/etg/arbeitsgebiete/v1/zeit-zum-handeln-fuer-eine-zukunftsfaeihige-energiestrategie>



Universität Stuttgart

Vielen Dank!



Prof. Dr.-Ing. Hendrik Lens

E-Mail hendrik.lens@ifk.uni-stuttgart.de

Telefon +49 (0) 711 685-66213

Fax +49 (0) 711 685-63491

Universität Stuttgart

Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik

Pfaffenwaldring 23 • 70569 Stuttgart

