



TU Clausthal

Herbsttagung des Arbeitskreises Energie 2026

Elektrische Energiespeicherung

Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer

Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme

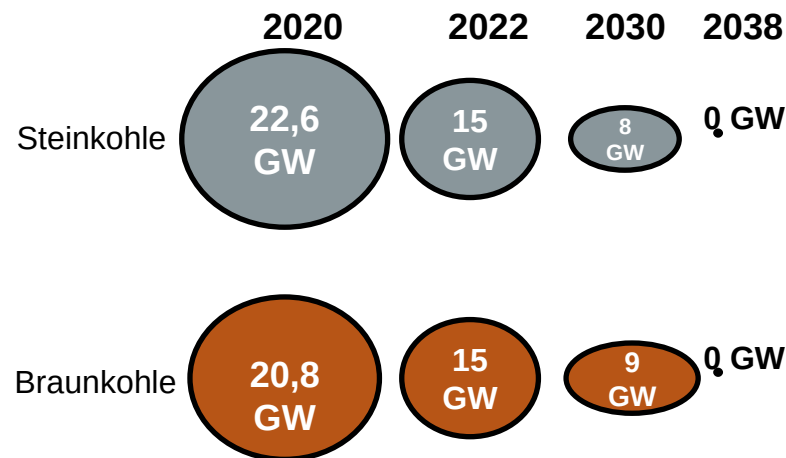
Technische Universität Clausthal

Klimaziele für Deutschland

- 2030 Reduktion der CO₂ Emissionen um 65% im Vergleich zu 1990
- 2045 CO₂ Neutralität

■ Wie erreichen wir das?

- Ausstieg aus der Kohle-
verstromung
- Ausstieg aus Erdgas
- Erneuerbare Energien in
allen Sektoren



CO₂ Neutralität in allen Sektoren

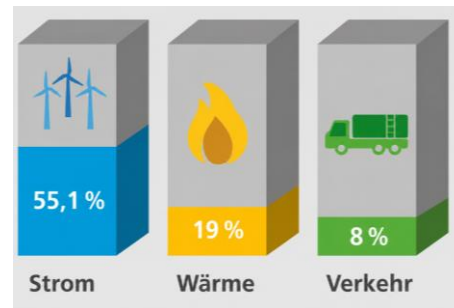
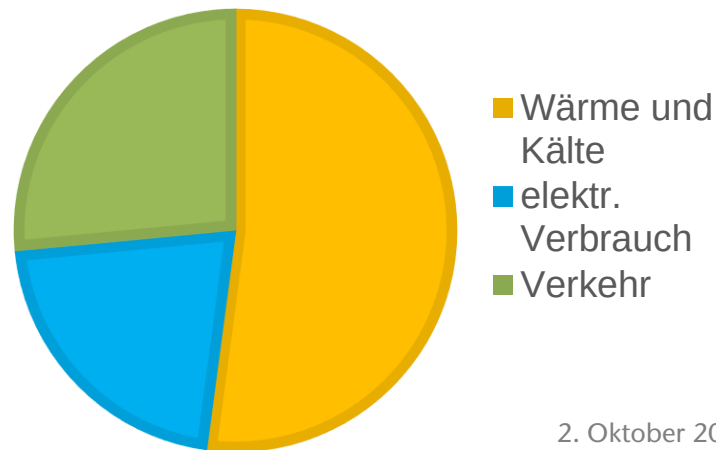
- Anteile der erneuerbaren Erzeugung in Sektor

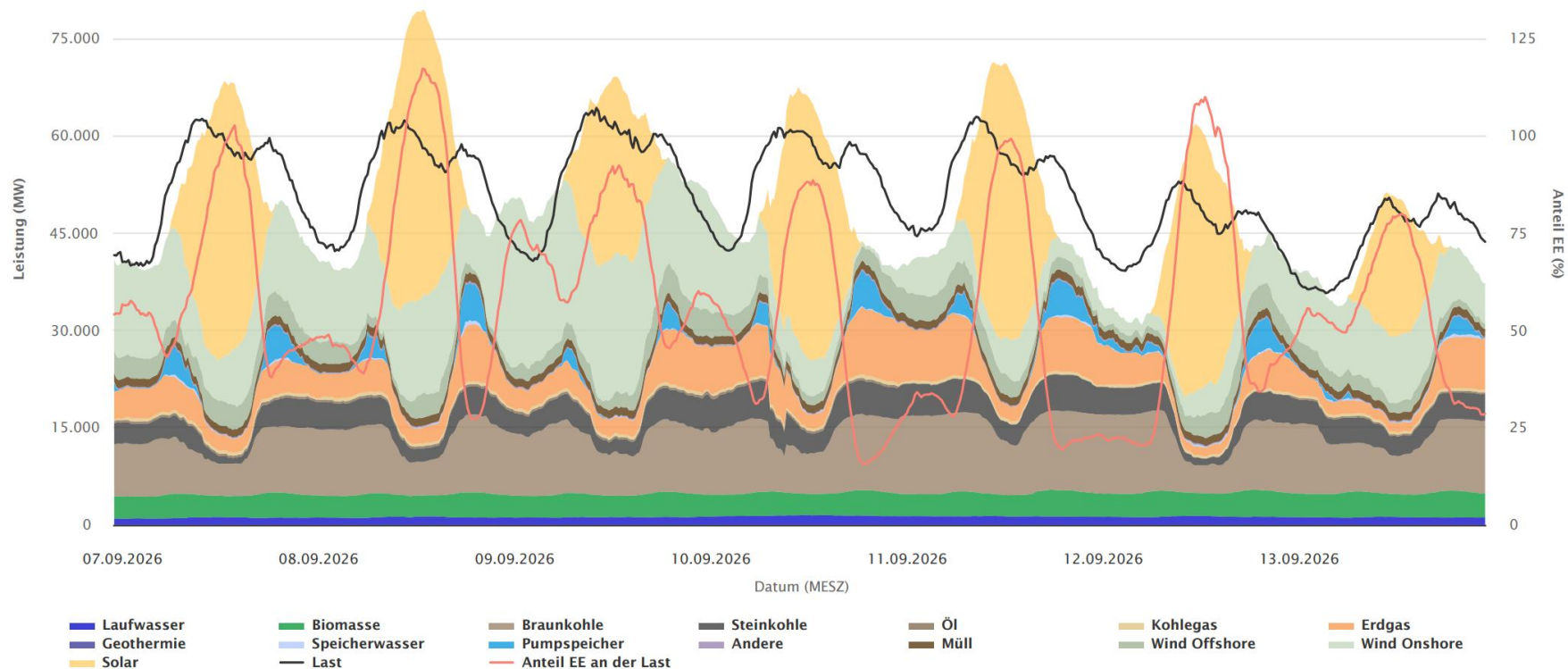
- elektrische Energie
- Wärme und Kälte
- Verkehr

→ 100%

- Anteile der einzelnen Sektoren am Gesamtenergieverbrauch

- Elektrische Energie
- Wärme und Kälte
- Verkehr



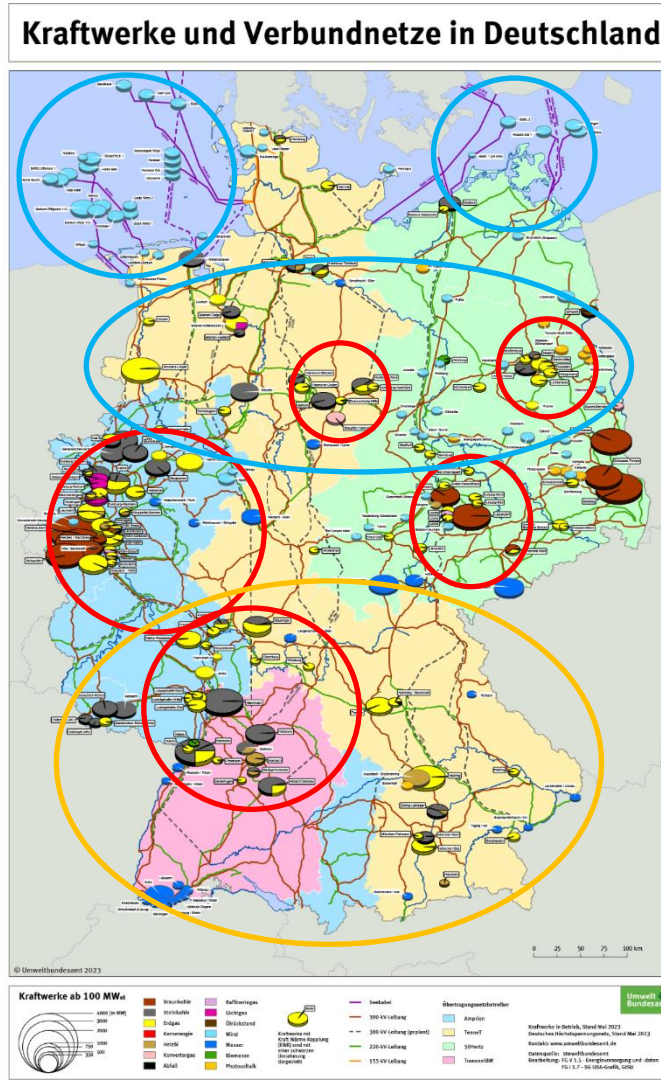


Energy-Charts.info; Datenquelle: ENTSO-E, AGEE-Stat, Destatis, Fraunhofer ISE, AG Energiebilanzen, EEX; Letztes Update: 16.09.2026, 13:11 MESZ

Herausforderungen für das elektrische Netz

- Konventionelle Kraftwerke sind nahe an Lastzentren → werden abgeschaltet
- Große Windparks werden im Norden Deutschlands angeschlossen
 - (auf See): ca. 11,09 GW
 - an Land: 71,12 GW
- Große Photovoltaikanlagen erreichen im Süden höhere Erträge
- Photovoltaik Aufdachanlagen sind in ganz Deutschland verteilt
 - 118,2 GW

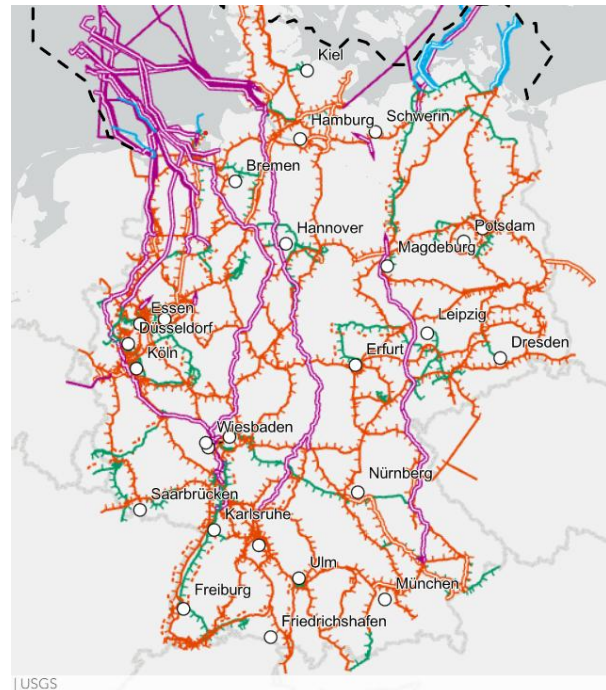
<https://www.umweltbundesamt.de/bild/kraftwerke-verbundnetze-in-deutschland>



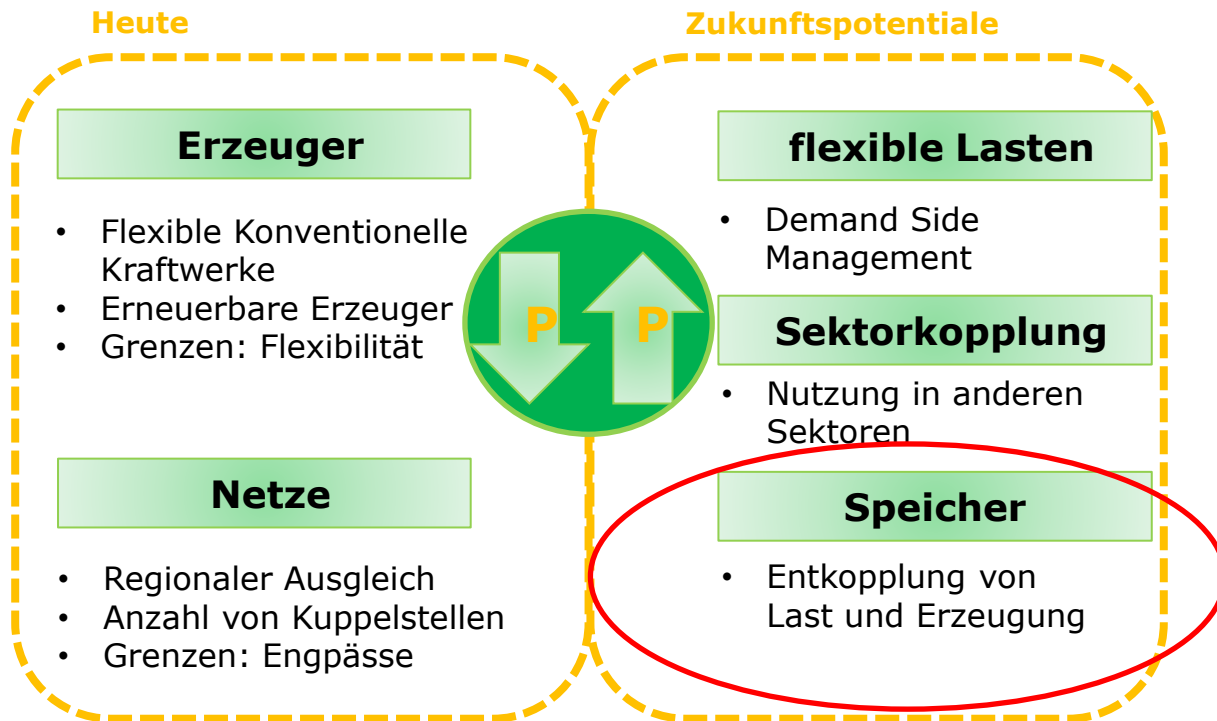
Herausforderungen für das elektrische Netz

- **Konventionelle Kraftwerke sind nahe an Lastzentren → werden abgeschaltet**
- Große Windparks werden im Norden Deutschlands angeschlossen
- Große Photovoltaikanlagen erreichen im Süden höhere Erträge
- Photovoltaik Aufdachanlagen sind in ganz Deutschland verteilt
- Folge:
 - Unzureichende Leitungskapazitäten
 - Netzausbau (AC,DC)

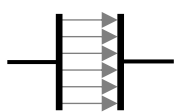
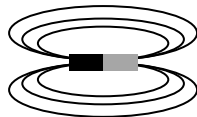
<https://www.vde.com/de/fnn/dokumente/karte-deutsches-hoehchstspannungsnetz>



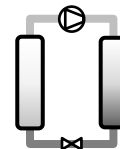
Flexibilitätstechnologien



physikalische Klassifizierung



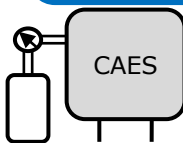
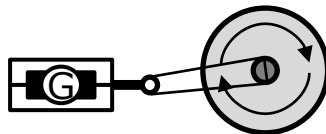
- Doppelschicht-Kondensator
- Supraleitende Spulen



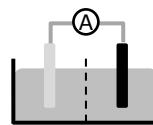
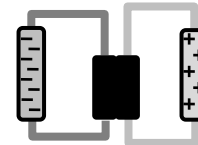
- Wärmespeicher
- Phasenwechselspeicher



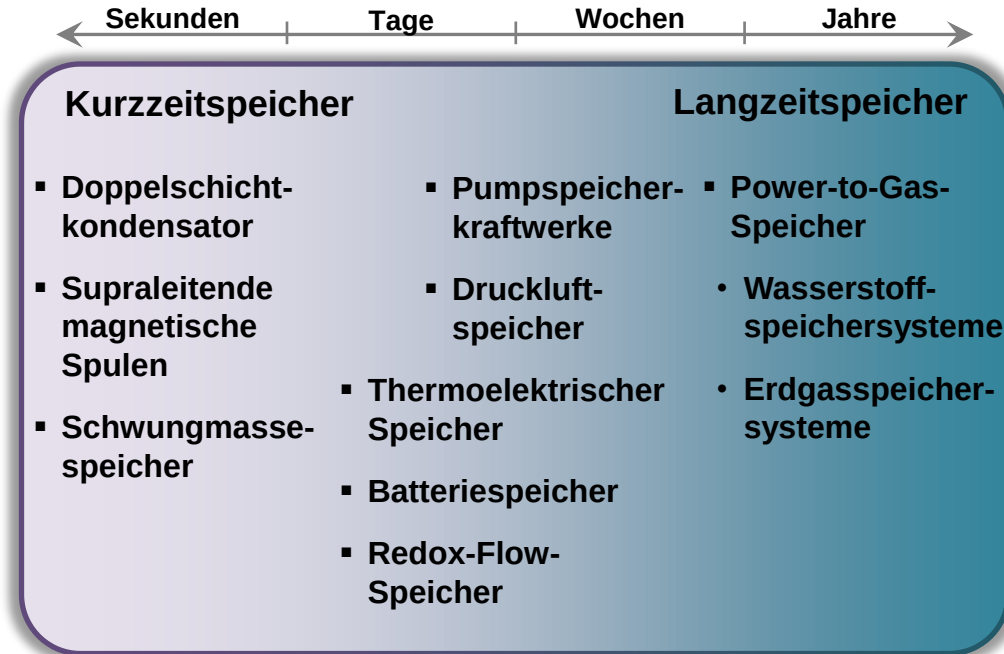
- Pumpspeicherkraftwerk
- Druckluftspeicher
- Schwungradspeicher



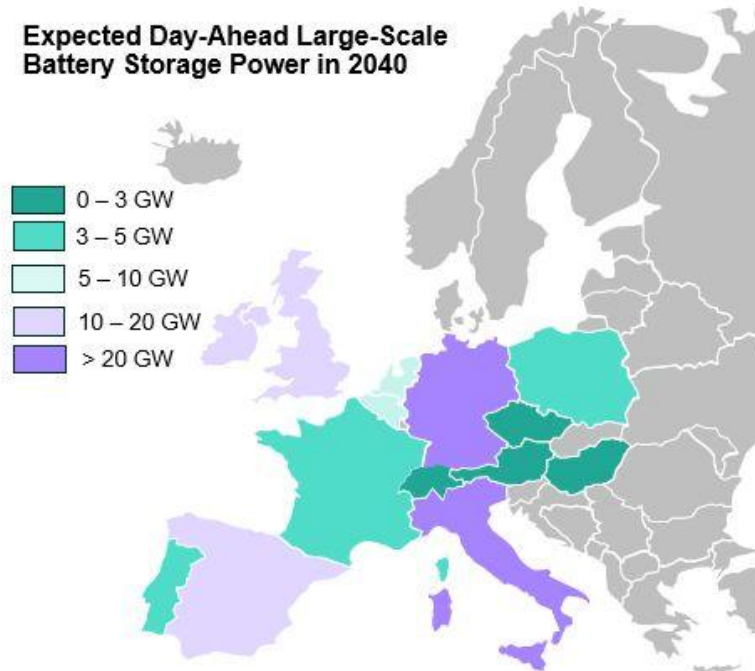
- Batteriespeicher
- Redox-Flow-Speicher
- Power-2-X



- Technologische Unterschiede
- Einsatzdauer entscheidend für Speichervariante



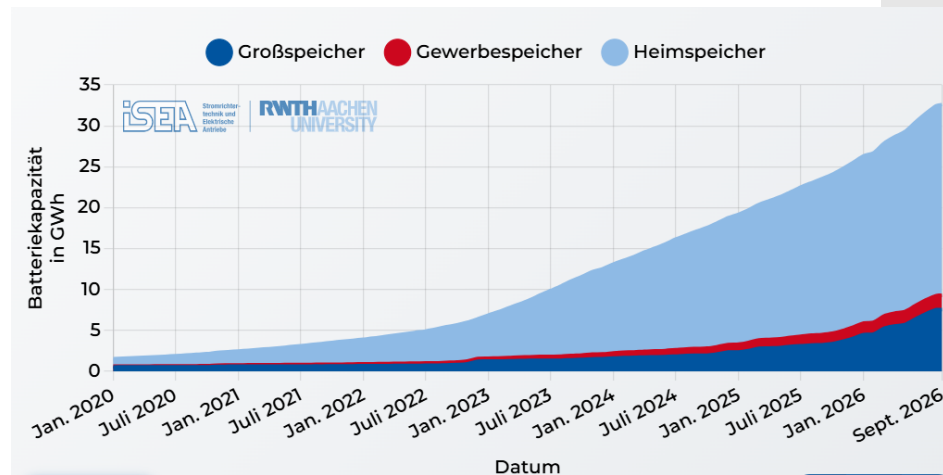
Zukunft: Großbatteriespeicher in Europa



Quelle: Montel Analytics

Aktueller Stand Installierte Batteriespeicher

- 23 GWh Haushaltspeicher
 - Anzahl 1.800.000 (2024)
- 1,7 GWh Gewerbespeicher
- 7,34 GWh Großspeicher



Größter Batteriespeicher in Deutschland

- Bollingstedt (Schleswig-Holstein)
- In Betrieb seit Frühjahr 2025
- Kapazität: 238 MWh
- Leistung: 103,5 MW
- Speicherung von Überschüssen aus Solar und Wind
- Technologie: Lithium-Ionen
- Spannungsebene: 110 kV



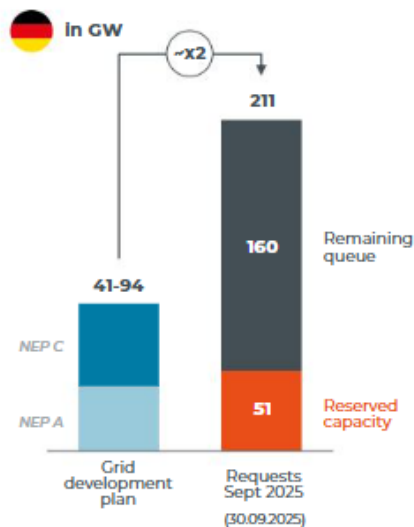
Foto: Frank Molter/dpa

Größter geplanter Batteriespeicher in Deutschland

- Klostermansfeld
- Kapazität: 5700 MWh
- Leistung: 1000 MW
- 600.000 Haushalten für einen Tag
- Inbetriebnahme Sommer 28

Foto: Frank Molter/dpa

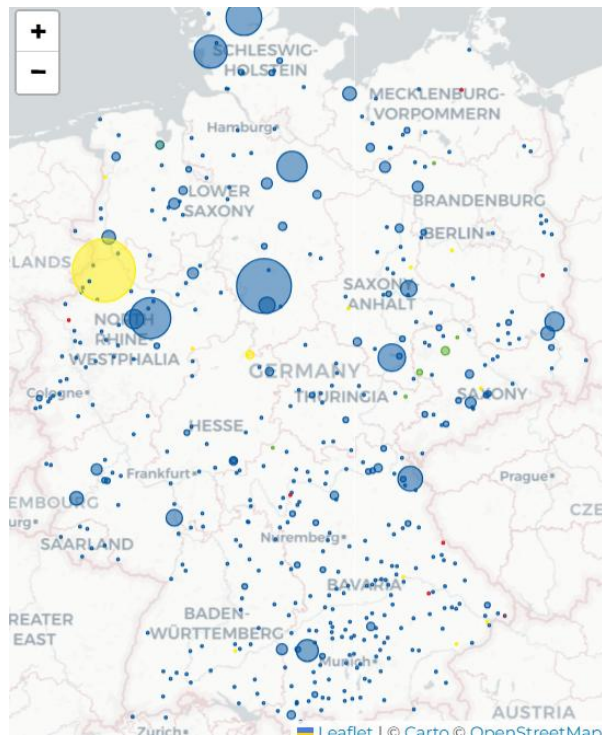
Schätzung Netzanschlussbegehren vom 29.8.25



Wieviel kommen wirklich?
1/5?

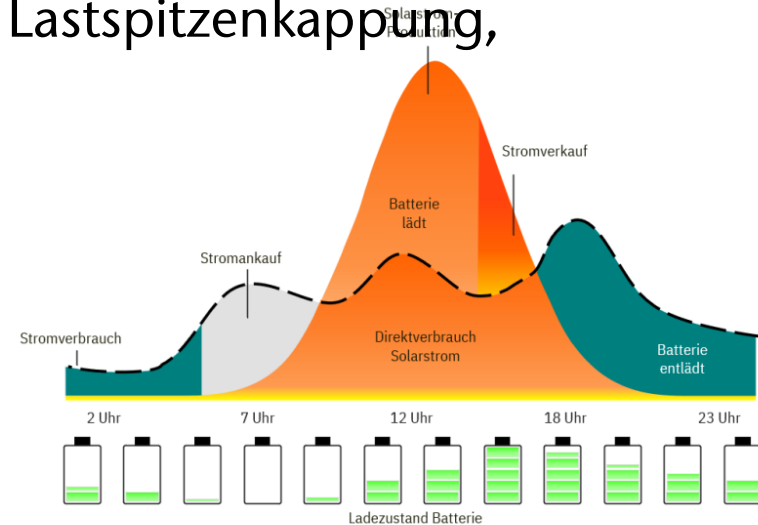
→ ÜNB haben 53 GW /142 GWh
zugesagt

Verteilung Großbatteriespeicher in Deutschland



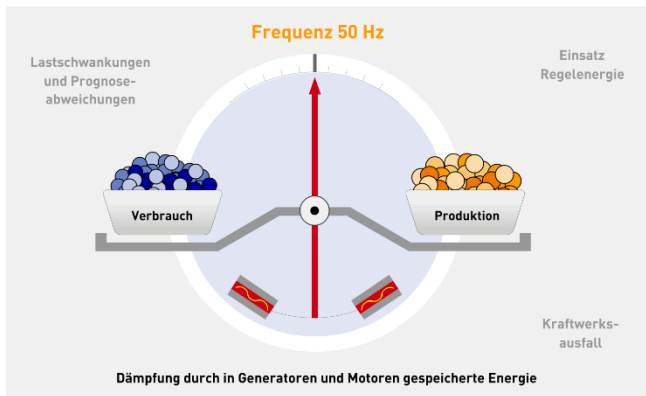
Betriebsstrategien von Großbatteriespeicher

- Systemdienstleistungen
- Industrie: Lastspitzenkappung, Eigenbedarf
- Integration erneuerbarer Energien: Lastspitzenkappung, Eigenbedarf
- Marktbasierte Nutzung



Quelle: 42technology AG

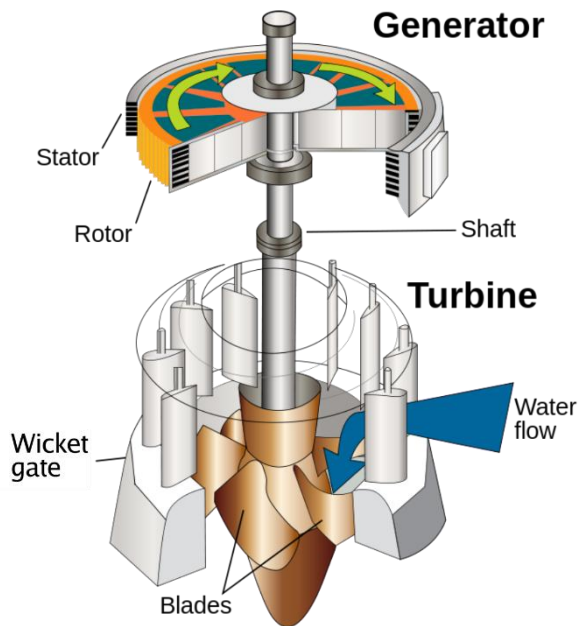
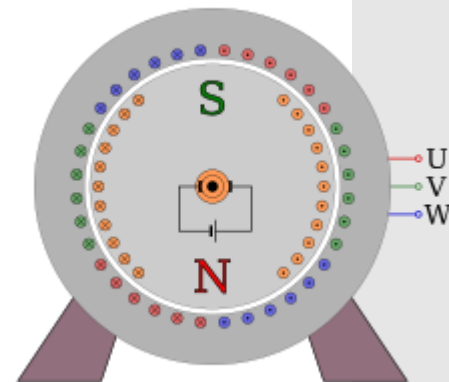
Frequenzstabilität



<http://docplayer.org/docs-images/24/3600638/images/9-0.png>

- Erzeugung und Verbrauch müssen zu jedem Netzknoten gleich groß sein
- Frequenzstabilität wird durch den Übertragungsnetzbetreiber verantwortet
- „fehlende Leistung“ wird durch die Trägheit unserer Kraftwerke und Regelreserve ausgeglichen

Wo ist Momentanreserve und Primärregelung?

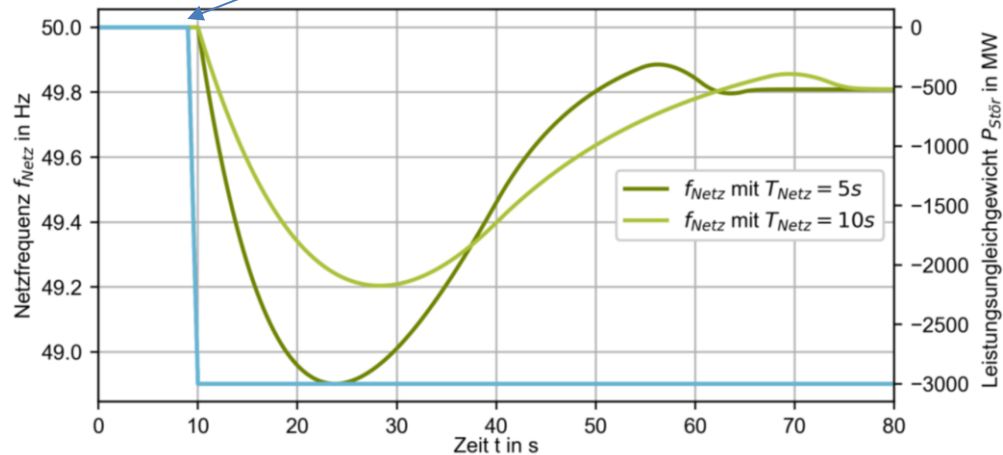


<https://www.usgs.gov/media/images/a-turbine-connected-a-generator-produces-power-inside-a-dam>

https://de.wikipedia.org/wiki/Synchronmaschine#/media/Datei:BalakovoNPP_tb.jpg

Frequenz

Großes Kraftwerk
geht ungeplant
vom Netz

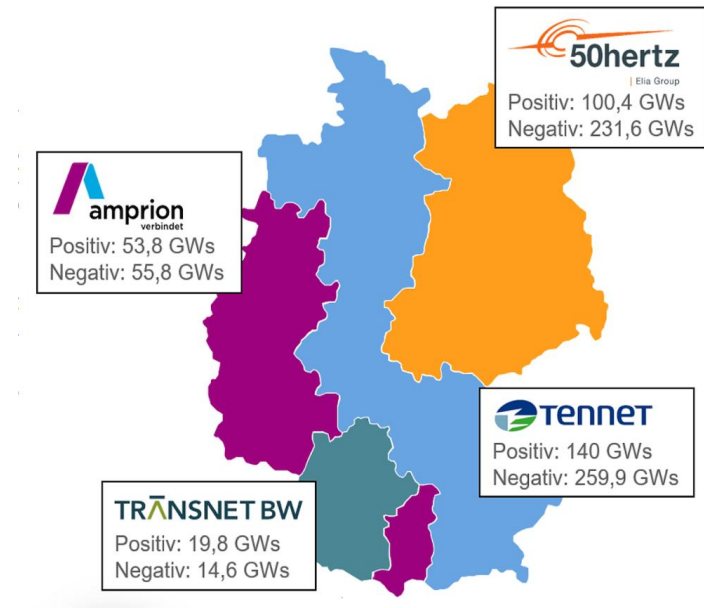


- Normalbereich
 - $df < \pm 200$ mHz,
 - Maßnahme: Regelreserve, Trägheit, Selbstregeleffekt
- kritischer Bereich:
 - $df > \pm 200$ mHz,
 - Frequenzabhängige Reduzierung der Einspeisung
 - Frequenzabhängiger Ein- und Ausspeicherbetrieb
- Notfall
 - ab 49 Hz Lastabwurf
 - 47,5 Trennung aller Anlagen

Wer übernimmt zukünftig die schnelle Reaktion auf Frequenzänderungen?

Roadmapsystemstabilität

- Entwicklung eines gemeinsamen Zielbildes des zukünftigen Stromversorgungssystems
- Systemstabilität aus Erneuerbaren Energien, Verbrauchern und Speichern
- Netzbildende Umrichter, die Momentanreserve, Kurzschlussstrom zur Verfügung stellen



[Marktgestützte Beschaffung von Momentanreserve](#)

Quelle: <http://www.rvs.uni-bielefeld.de/Bieleschweig/ninth/SiekerB9Slides.pdf>

Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer

Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme

Netzanschlussbedingungen der ÜNB für Speicher

- Gehen über gültige VDE-AR-N 4130 hinaus
 - Müssen netzbildende Eigenschaften aufweisen
 - für den marktorientierten Einsatz von BESS eine Begrenzung der Leistungsgradienten 10% Pb,inst/min
 - Konzept für Schwarzstart und Wiederaufbau
 - Markt für Momentanreserve

https://www.netztransparenz.de/xspproxy/api/staticfiles/ntp-relaunch/dokumente/%C3%BCber%20uns/studien%20und%20positionspapiere/anforderungen%20an%20batteriespeichersystemen/2024_zus%C3%A4tzliche_technische_anforderungen_an_den_anschluss_von_batteriespeichersystemen_im_hos-netz.pdf

Markt für Momentanreserve

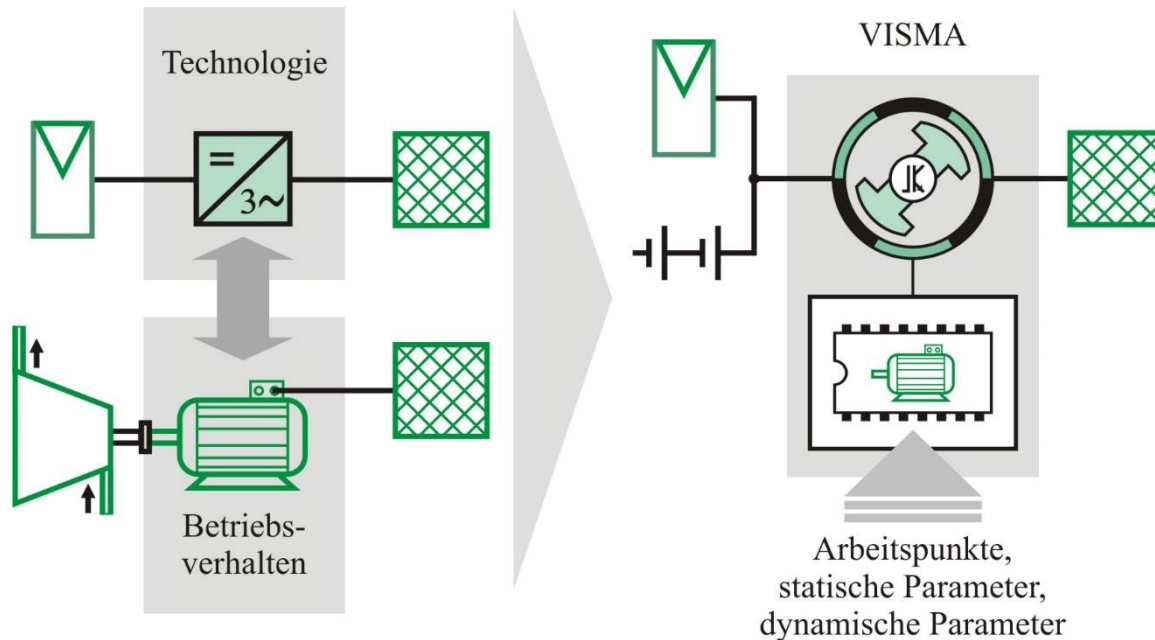
- Vergütung für die Vorhaltung 76 -888 €/MWs/Jahr
 - Abhängig von der Verfügbarkeit der Anlage (ab 30% pro Jahr)
 - pos. und negative Bereitstellung möglich

- Berechnung der bereitgestellten Momentanreserve

$$E_{\text{Mom}} = 0,5 \cdot P_N \cdot T_A$$

$$\text{mit } T_A \leq 25s$$

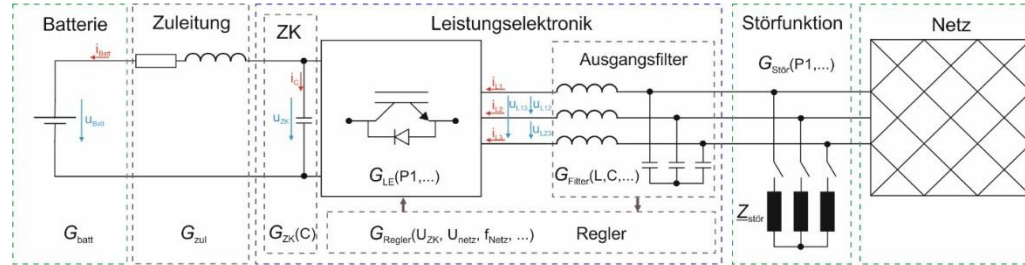
Grundidee VISMA zur Bereitstellung von Momentanreserve



Grundidee der Virtuellen Synchronmaschine (VISMA):
Nachbildung des
dynamischen und stationären
Verhaltens einer
Synchronmaschine mit Hilfe
eines Umrichters.

Entwicklung eines Drei-Level-Modells

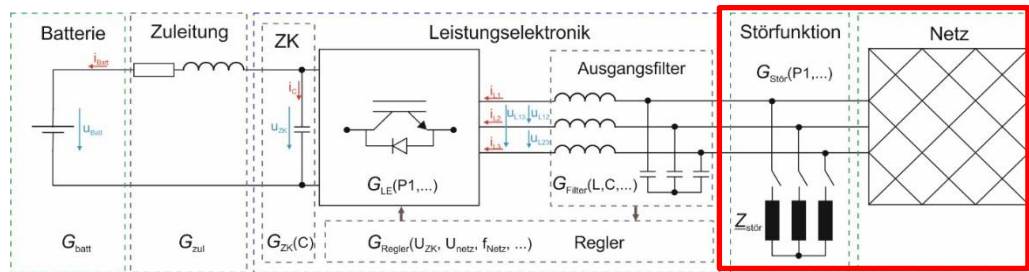
- Wie sind die dynamischen Flüsse zwischen elektrischem Netz-
Umrichter-Batterie?



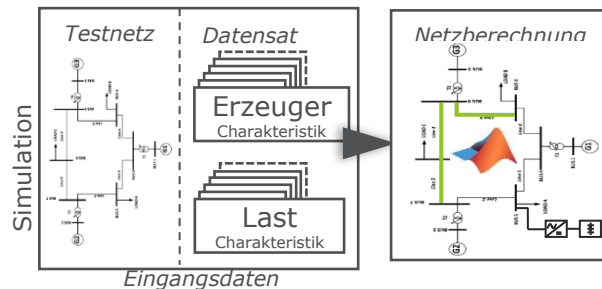
- Entwicklung verschiedener Systemvarianten für unterschiedliche
Untersuchungsaspekte

Entwicklung eines Drei-level-Modells

- Wie sind die detaillierten Flüsse zwischen elektrischem Netz-Umrichter-Batterie?

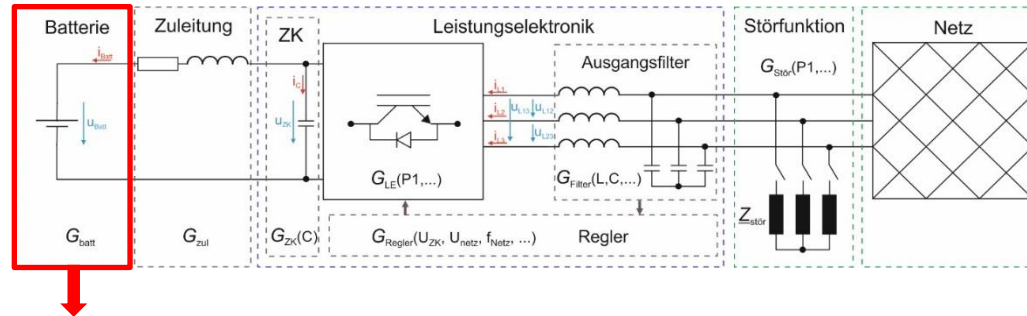


- Zeitsimulation im detaillierten Netzmodell
 - Störungen z.B. Kraftwerksverlust/Lastverlust
- aggregiertes Netzmodell
 - Frequenzverläufe

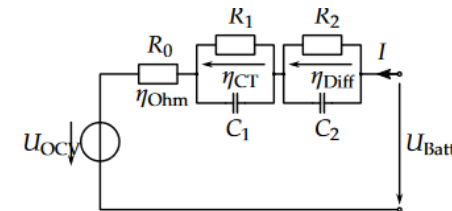


Entwicklung eines Drei-level-Modells

- Wie sind die dynamischen Flüsse zwischen elektrischem Netz-Umrichter-Batterie?

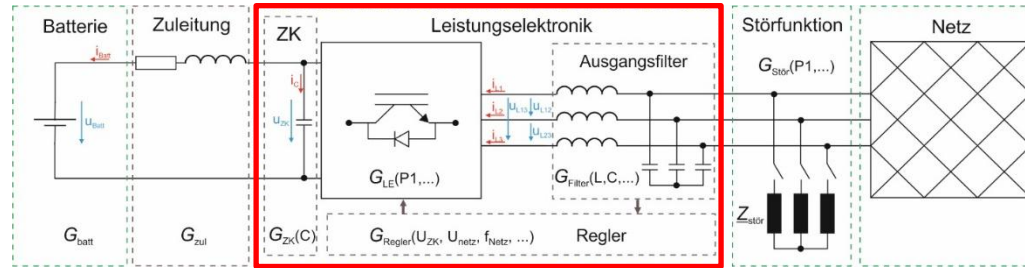


- Second-order RC equivalent model
- Parametrierung erfolgt basierend auf Batterietests für unterschiedliche Batteriezelltypen
- Batteriesystem 1MW/100kWh



Entwicklung eines Drei-level-Modells

- Wie sind die dynamischen Flüsse zwischen elektrischem Netz-Umrichter-Batterie?



- Nachbildung des Umrichters als getaktetes Modell und gemittelttes Modell
- Implementierung der Regelung einer virtuellen Synchronmaschine
 - Untersuchung verschiedener Reglerparameter
 - Untersuchung verschiedener L, C Größen

VDE FNN "Technischen Anforderungen an Netzbildende Eigenschaften inklusive der Bereitstellung von Momentanreserve"

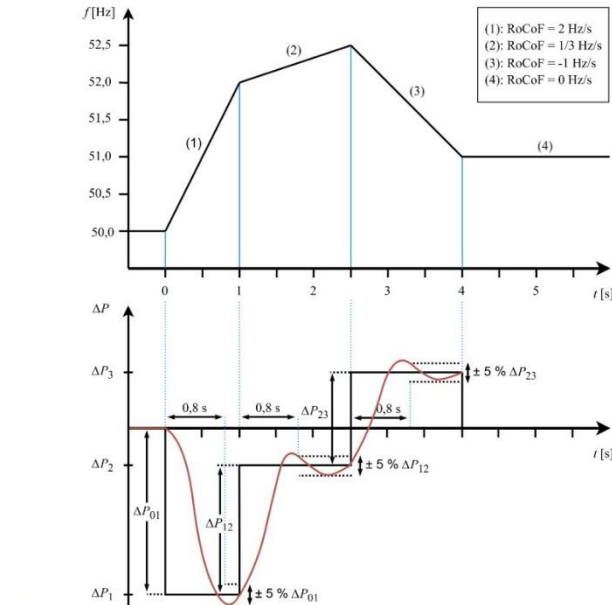


Bild 11 Beispielhafte Auswertung der Anlaufzeitkonstanten und Momentanreserveleistung bei Vermarktung negativer Momentanreserve für $T_A < 10$ s

Quelle: VDE FNN

Forderungen:

Wirkleistungsreaktion nach Frequenzveränderungen

VISMA (siehe Aspekt Momentanreserve)

Festlegung der dynamischen Reaktion auf Frequenzveränderung

Rotorträgheitsmoment

Dämpfung

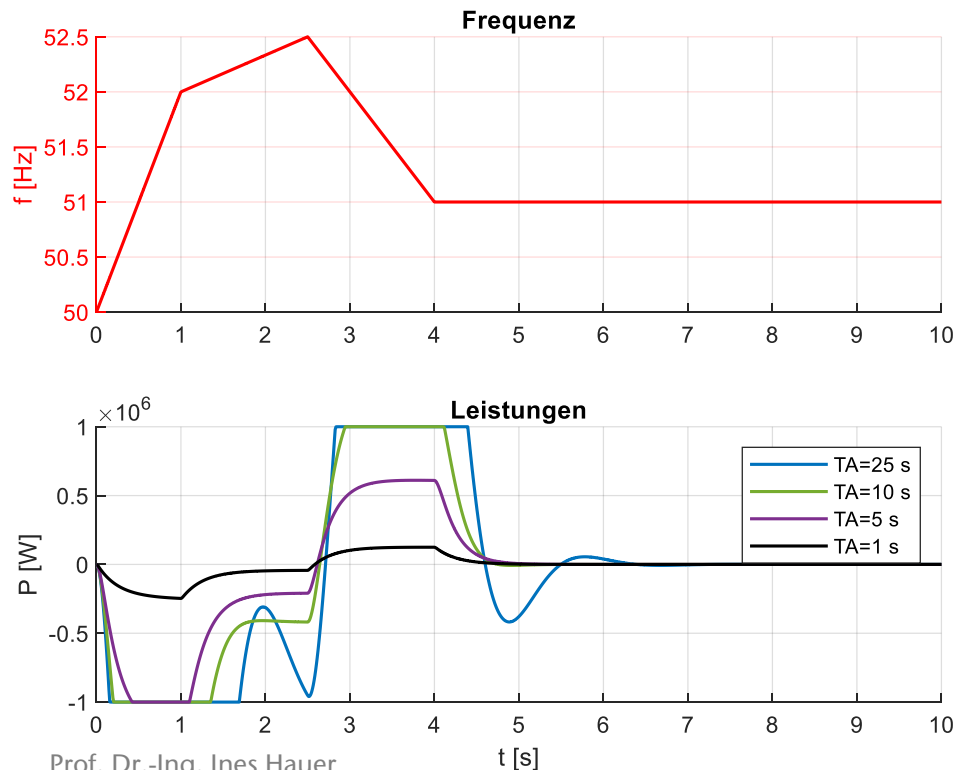
Statorimpedanz

Festlegung der anschließenden statischen Reaktion auf Frequenzveränderung

Statorimpedanz

Überlagerte Kraftwerkregler (Statiken)

Ergebnisse des Drei-Level Modells



Simulation der Batteriesystemreaktion auf einen Frequenzsprung:

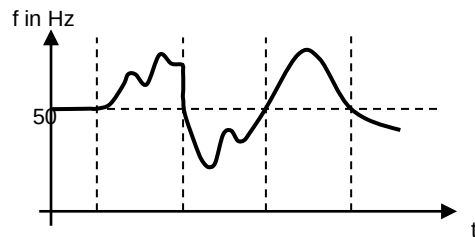
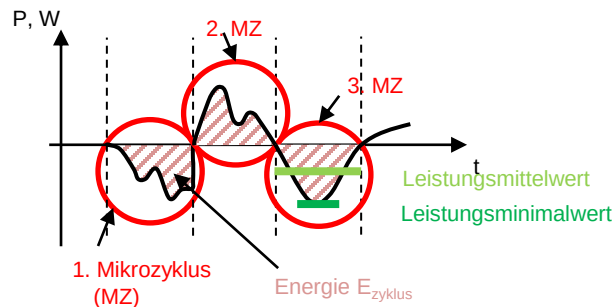
- verschiedene Massenträgheiten J
- Dämpfungskonstante konstant
- Hier Leistung begrenzt auf Umrichterleistung
- Teilweise auch Überlastfähigkeit bei Umrichters z.B. 10 % (SMA) implementiert



Wie ist der Einfluss auf die Batterie?

Batteriebelastung: Was kommt in der Batterie an?

- Eingang in das Modell:
 - Frequenzverlauf für eine Woche Jan 21
- Bestimmung von Mikrozyklen
 - Energieinhalt
 - Leistungsmittelwerte
 - Leistungsminima und Leistungsmaxima
- Ziel: Bewertung der Batteriebelastung
 - Energieinhalt der Zyklen
 - Leistungsabruf aus der Batterie



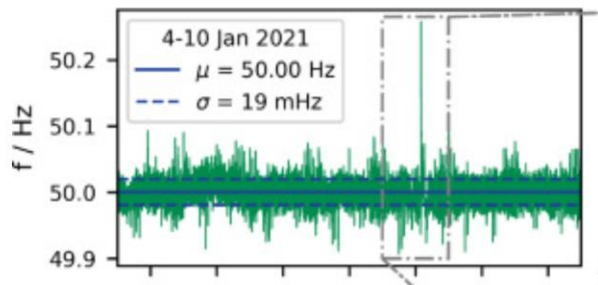
•Klink, J.; Helm, S.; Yang, W.; Deblon, F.; Benger, R.; Hauer, I.; Lindemann, A.

Instantaneous reserve by battery energy storage systems - a holistic system model to analyze the dynamic power system interactions

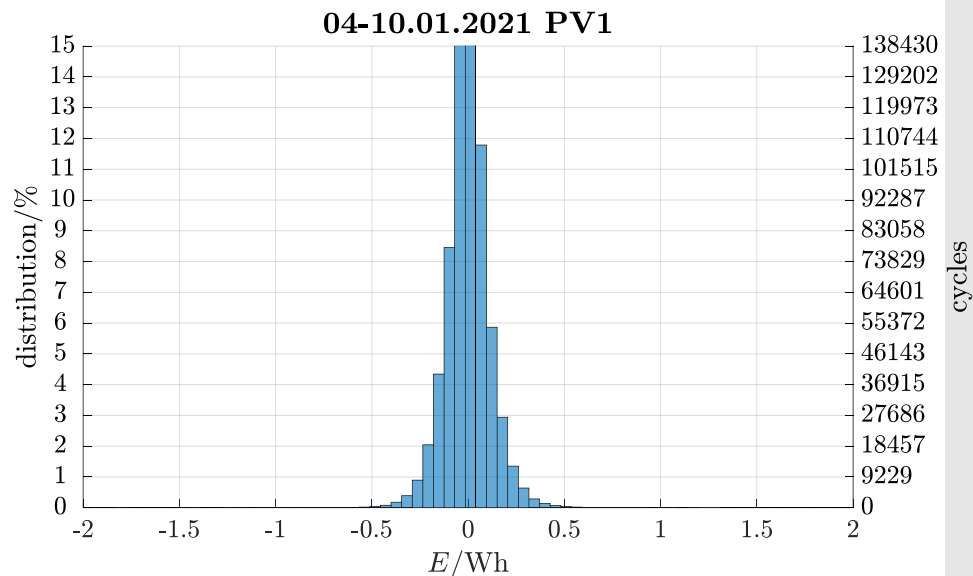
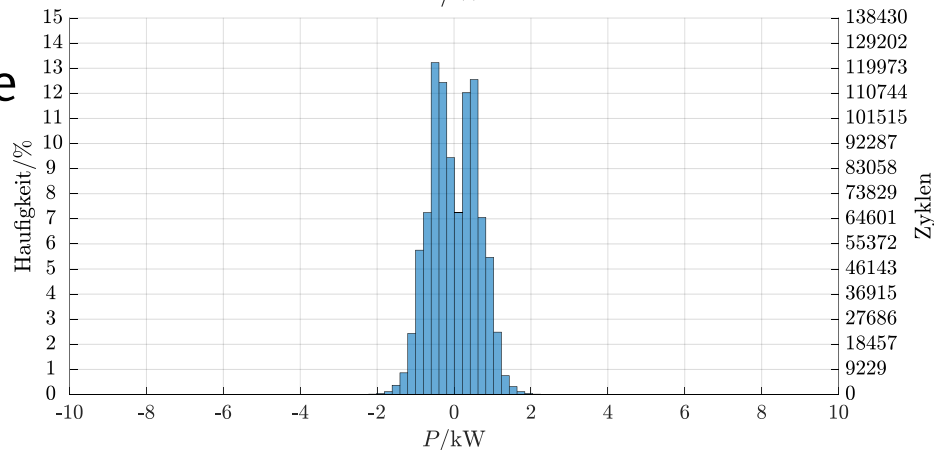
ScienceDirect Energy Reports Volume 13: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484725001210?via%3Dihub>,

(Februar 2025)

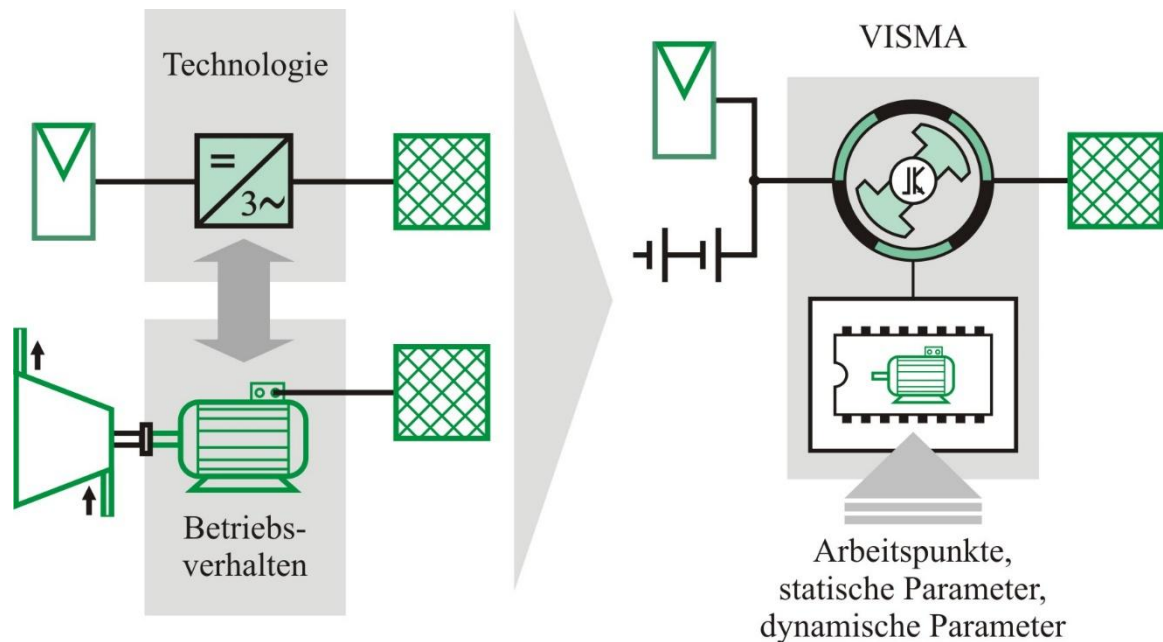
Auswertung



- 1MW/100 kWh Batterie
- Frequenzverlauf für eine Woche
- Sehr geringe Ausnutzung
- Batterie sieht sehr viele kleine Zyklen
- Hohes P/C -Verhältnis



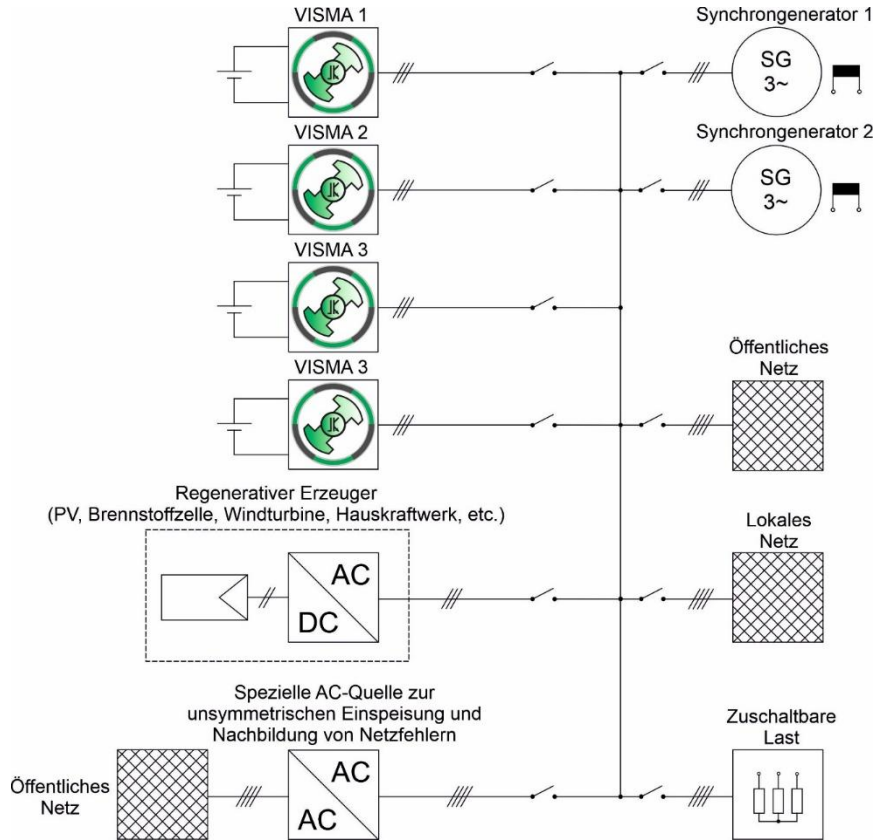
Grundidee VISMA / Vorstellung



- Grundidee der Virtuellen Synchronmaschine (VISMA):
- Nachbildung des dynamischen und stationären Verhaltens einer Synchronmaschine mit Hilfe eines Umrichters
 - Entwicklung seit 20 Jahren

<https://www.iee.tu-clausthal.de/forschung/veroeffentlichungsliste>

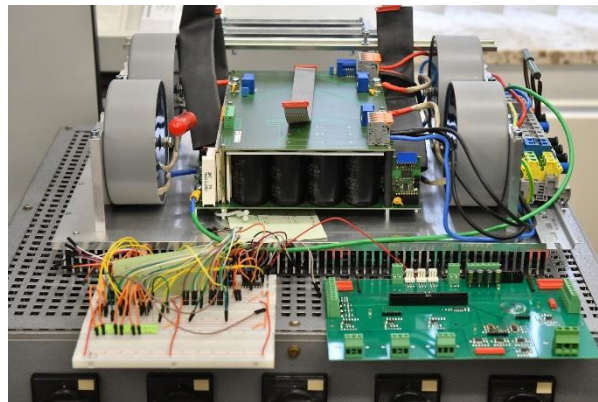
Grundidee VISMA / Vorstellung Verteilnetzlabor



Netzstruktur im Verteilnetzlabor Goslar:

- Insel- und Netzparallelbetrieb in verschiedenen Konfigurationen ist möglich
- Test verschiedener Varianten und Parameterkombinationen
- Zusammenschaltungen verschiedener Umrichterparametrierungen und Regelungsstrategien

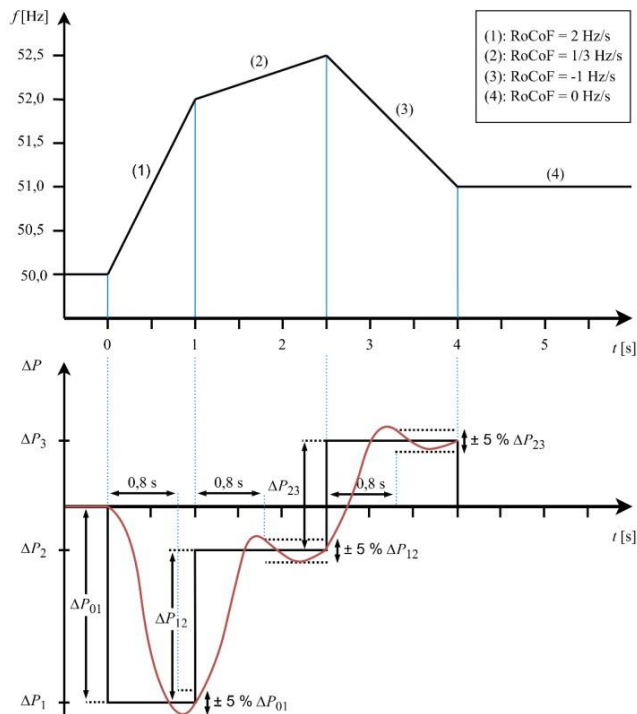
Grundidee VISMA / Vorstellung Verteilnetzlabor



Verteilnetzlabor Goslar

Anschlußbedingungen: Anlaufzeitkonstante

VDE FNN "Technischen Anforderungen an Netzbildende Eigenschaften inklusive der Bereitstellung von Momentanreserve,,



Quelle: VDE FNN

Forderungen:

Wirkleistungsreaktion nach Frequenzveränderungen

VISMA (siehe Aspekt Momentanreserve)

Festlegung der dynamischen Reaktion auf Frequenzveränderung

Rotorträgheitsmoment

Dämpfung

Statorimpedanz

Festlegung der anschließenden statischen Reaktion auf Frequenzveränderung

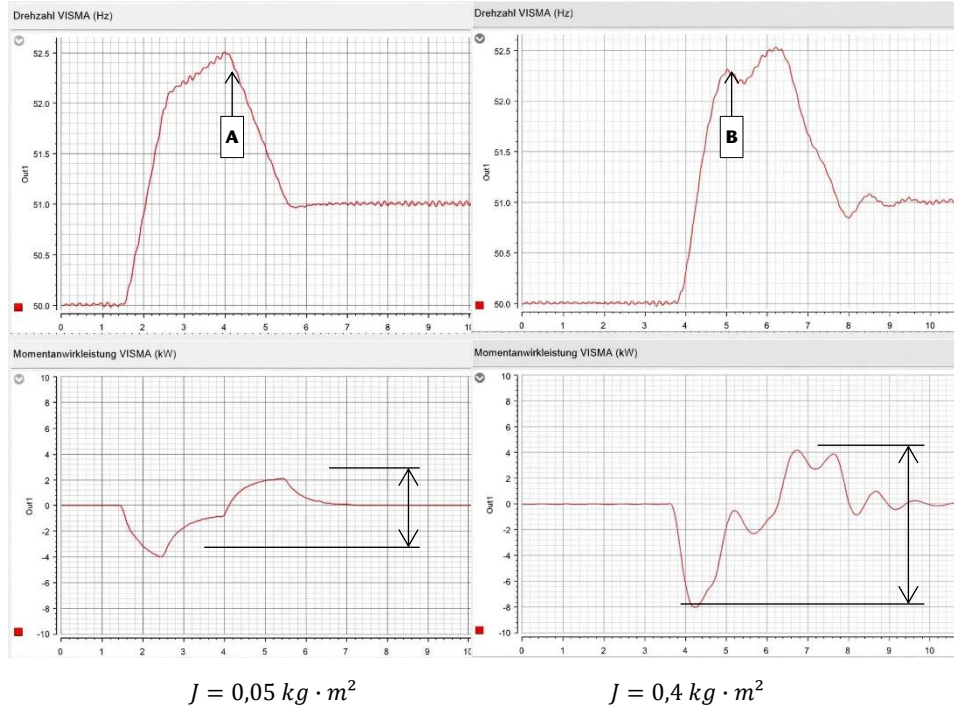
Statorimpedanz

Überlagerte Kraftwerkregler (Statiken)

Bild 11 Beispielhafte Auswertung der Anlaufzeitkonstanten und Momentanreserveleistung bei Vermarktung negativer Momentanreserve für $T_A < 10 \text{ s}$

Bereitstellung netzunterstützender Momentanreserve: Wirkleistungsreaktion der VISMA auf Netzfrequenzveränderungen

Momentanreserve in Abhängigkeit der Rotormassträgheit | bei unveränderter Rotordämpfung D



A:
Rotordrehzahl folgt der
veränderlichen Netzfrequenz
aufgrund der geringen
Masseträgheit nahezu direkt

B:
Häufige dynamische
Abweichungen der
Rotordrehzahl vom Verlauf der
veränderlichen Netzfrequenz
aufgrund hoher Masseträgheit
insbesondere infolge der
resultierenden
Einpendelbewegungen

Fazit:(1)
Proportionaler Zuwachs der
dynamischen Wirkleistungsreaktion
und damit Momentanreserve bei
Erhöhung der Rotormassträgheit
der VISMA
(2)
Mitabstimmung der
Rotordämpfung bei Erhöhung der
Rotormassträgheit sinnvoll

Zusammenfassung

- Energiespeicher sind vielseitig und können unterschiedliche Aufgaben im elektrischen Netz übernehmen
 - zeitliche Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch
 - Kurzfristiges Ein- und Ausspeichern von Energie ist möglich, um die Einspeisegradien zu beherrschen
 - können Beitrag liefern zur 100% Integration von erneuerbaren Erzeugern, Minderung der Abregelung
 - beherrschen von Prognoseabweichungen
 - Systemdienstleistungen

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Für Fragen steht Ihnen zur Verfügung:

Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer

Ines.hauer@tu-clausthal.de

Wir haben die Energie zur Wende!