



Herausforderungen einer resilienten und stabilen Energieversorgung

Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer

Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme

Technische Universität Clausthal

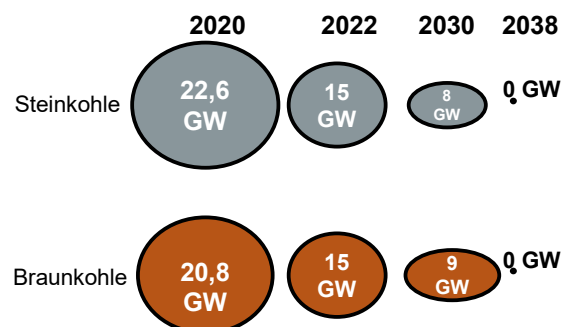


Klimaziele für Deutschland

- 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

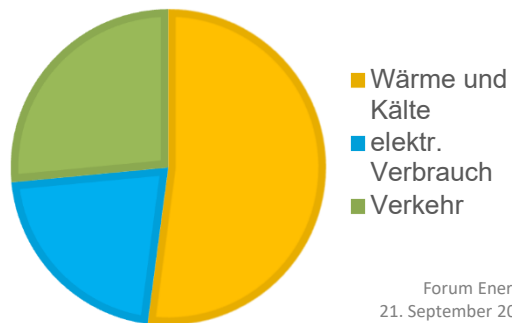
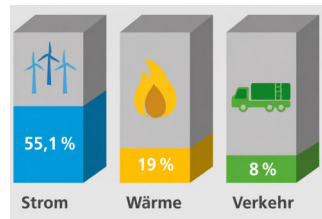
→ 100%

- Anteile der einzelnen Sektoren am Gesamtenergieverbrauch

- Elektrische Energie

- Wärme und Kälte

- Verkehr

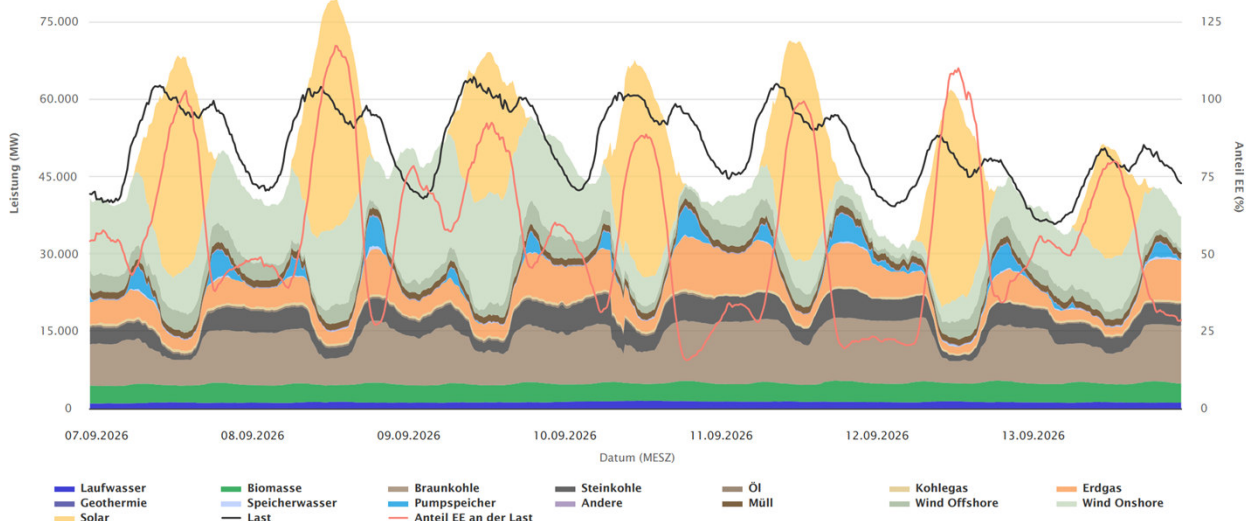


Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer
Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme

Forum Energie
21. September 2026

3

3



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

Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer
Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme

Forum Energie
21. September 2026

4

4

Herausforderungen für das elektrische Netz

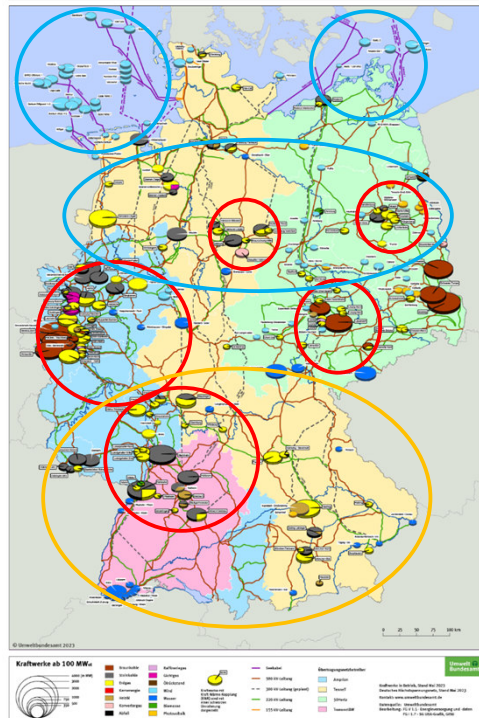
- Konventionelle Kraftwerke sind nahe an Lastzentren
→ werden abgeschaltet
- Große Windparks werden im Norden Deutschlands angeschlossen
 - (auf See): ca. 11,09 GW
 - an Land: 71,12 GW
- Große Photovoltaikanlagen erreichen im Süden höhere Erträge
- Photovoltaik Aufdachanlagen sind in ganz Deutschland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

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

Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer

Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme

Kraftwerke und Verbundnetze in Deutschland



5

5

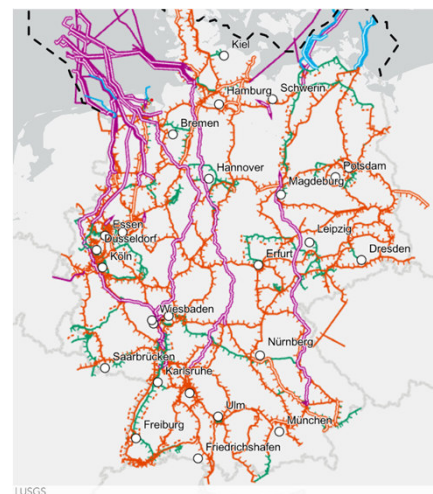
Herausforderungen für das elektrische Netz

- 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>

Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer

Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme

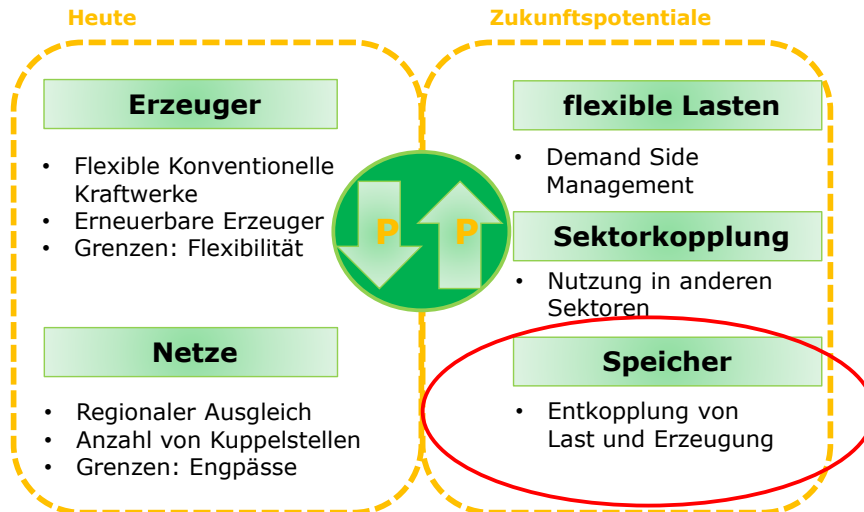


Forum Energie
21. September 2026

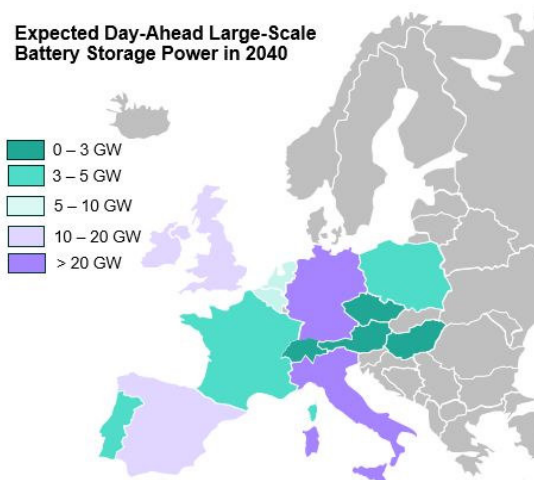
6

6

Flexibilitätstechnologien

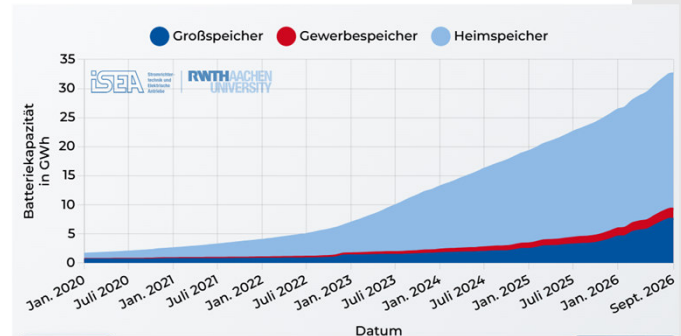


Zukunft: Großbatteriespeicher in Europa



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

Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer
Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme

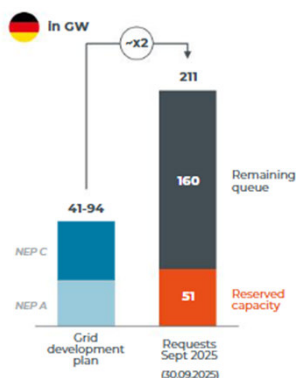
Forum Energie
21. September 2026

11

11



Schätzung Netzanschlussbegehren vom 29.8.25



Wieviel kommen wirklich?
1/5?

→ ÜNB haben 53 GW /142 GWh
zugesagt

https://issuu.com/eliagroup/docs/storage_for_system_strength_store_smartly_for_a_s

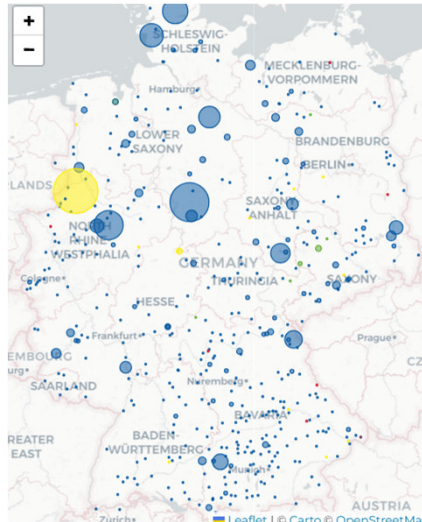
Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer
Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme

Forum Energie
21. September 2026

12

12

Verteilung Großbatteriespeicher in Deutschland



Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer
Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme

Quelle: www.battery-charts.de/de/battery-charts-de

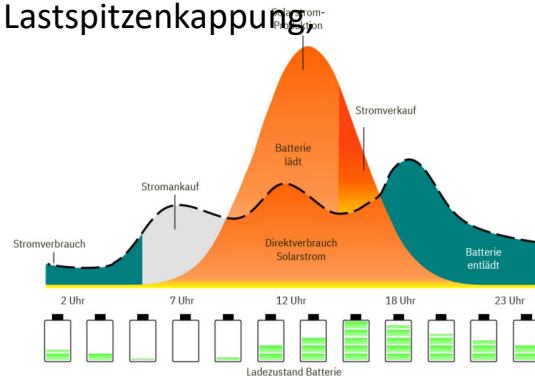
Forum Energie
21. September 2026

13

13

Betriebsstrategien von Großbatteriespeicher

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



Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer
Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme

Quelle: 42technology AG

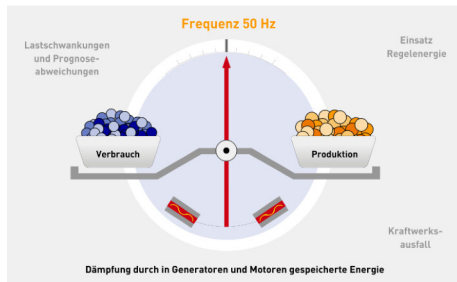
Forum Energie
21. September 2026

14

14

TU Clausthal

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

Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer
Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme

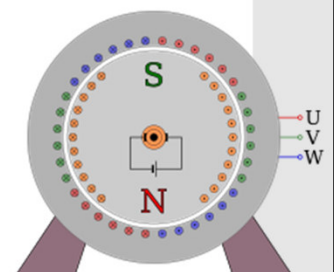
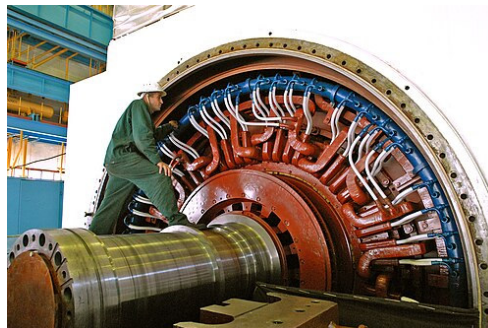
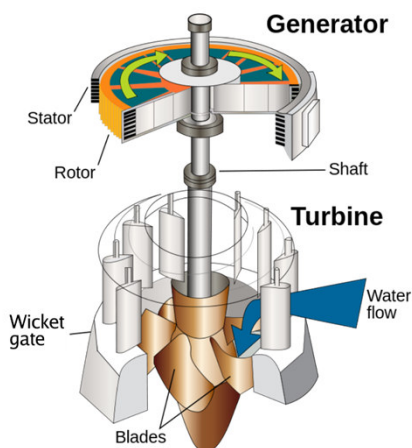
Forum Energie
21. September 2026

15

15

TU Clausthal

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

Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer
Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme

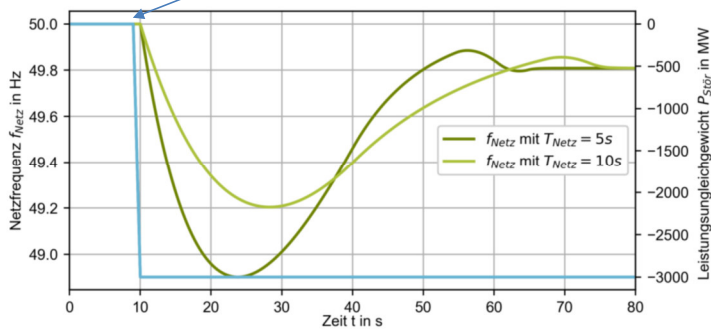
Forum Energie
21. September 2026

16

16

Frequenz

Großes Kraftwerk
geht ungeplant
vom Netz



Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer
Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme

Forum Energie
21. September 2026

17

■ Normalbereich

- $df < \pm 200 \text{ mHz}$,
- Maßnahme: Regelreserve, Trägheit, Selbstregelleffekt

■ kritischer Bereich:

- $df > \pm 200 \text{ mHz}$,
- Frequenzabhängige Reduzierung der Einspeisung
- Frequenzabhängiger Ein- und Ausspeicherbetrieb

■ Notfall

- ab 49 Hz Lastabwurf
- 47,5 Trennung aller Anlagen

17

Wer übernimmt zukünftig die schnelle
Reaktion auf Frequenzänderungen?

Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer
Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme

Forum Energie
21. September 2026

18

18



Roadmapsystemstabilität

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

Quelle: <http://www.rvs.uni-bielefeld.de/Bieleschweig/ninth/SiekerB9Slides.pdf>
Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer
Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme

Forum Energie
21. September 2026

19

19



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

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

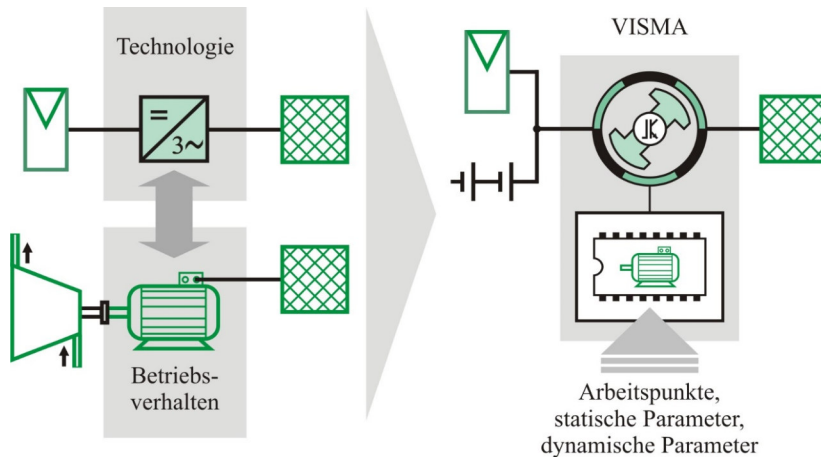
Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer
Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme

Forum Energie
21. September 2026

20

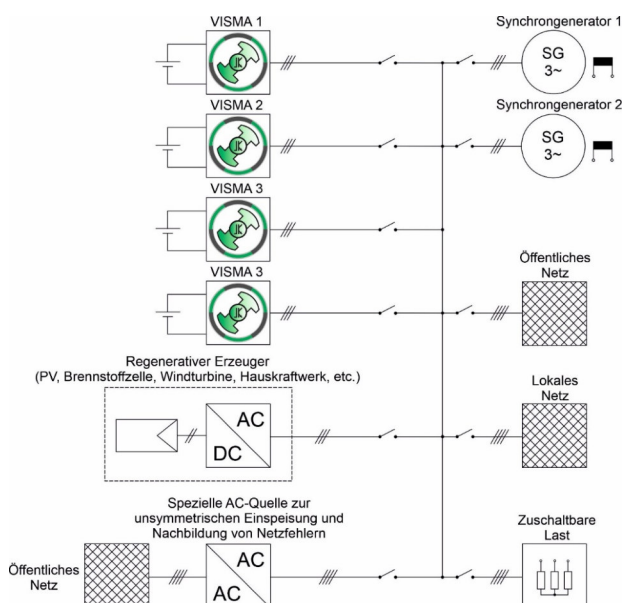
20

Grundidee VISMA / Vorstellung Verteilnetzlabor



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

Grundidee VISMA / Vorstellung Verteilnetzlabor

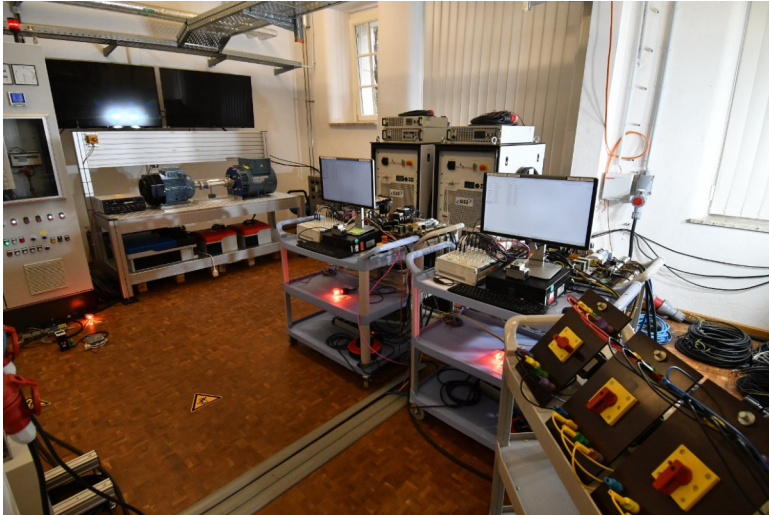


Netzstruktur im Verteilnetzlabor Goslar:
Insel- und Netzparallelbetrieb in verschiedenen Konfigurationen ist möglich

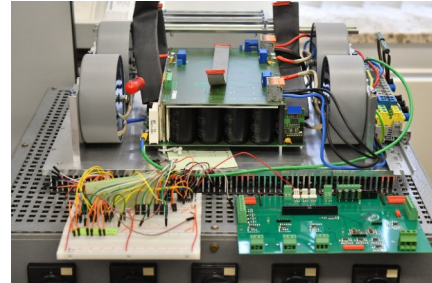


TU Clausthal

Grundidee VISMA / Vorstellung Verteilnetzlabor



Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer
Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme



Verteilnetzlabor Goslar

Forum Energie
21. September 2026

23

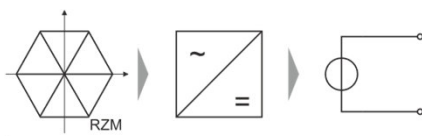
23



TU Clausthal

Vergleich von Wechselrichterkonzepten

Spannungsbildende Wechselrichter



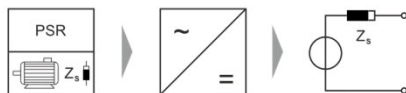
Ersatzschaltung: Spannungsquelle

Ohne weitere Vorkehrungen ausschließlich Inselbetrieb

Strombegrenzung erforderlich

Ursprung: Antriebstechnik

VISMA



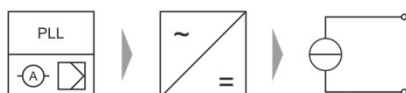
Ersatzschaltung: Spannungsquelle mit innerer Impedanz (vorwiegend Reaktanz)

Netzparallel- und Inselbetrieb mit unterbrechungsfreiem Übergang (bidirektional)

Inhärent und dauerhaft kurzschlußfest

Statorimpedanz: gemeinsame Wirkung der PSR und des überlagerten Maschinenmodells

Spannungsfolgende Wechselrichter



Ersatzschaltung: Stromquelle

Ausschließlich Netzparallelbetrieb

Stromregelung und Synchronisierung erforderlich

Aktuelle Technik der weitverbreiteten konventionellen Einspeisewechselrichter

RZM: Raumzeigermodulation

PSR: Phasenstromregelung

PLL: Phase Locked Loop

Z_s : Statorimpedanz

Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer
Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme

Forum Energie
21. September 2026

24

24

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

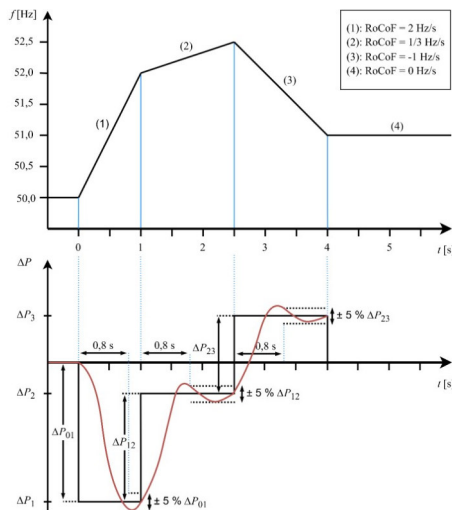


Bild 11 Beispielhafte Auswertung der Anlaufzeitkonstanten und Momentanreserveleistung bei Vermarktung negativer Momentanreserve für $T_A < 10$ s

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)

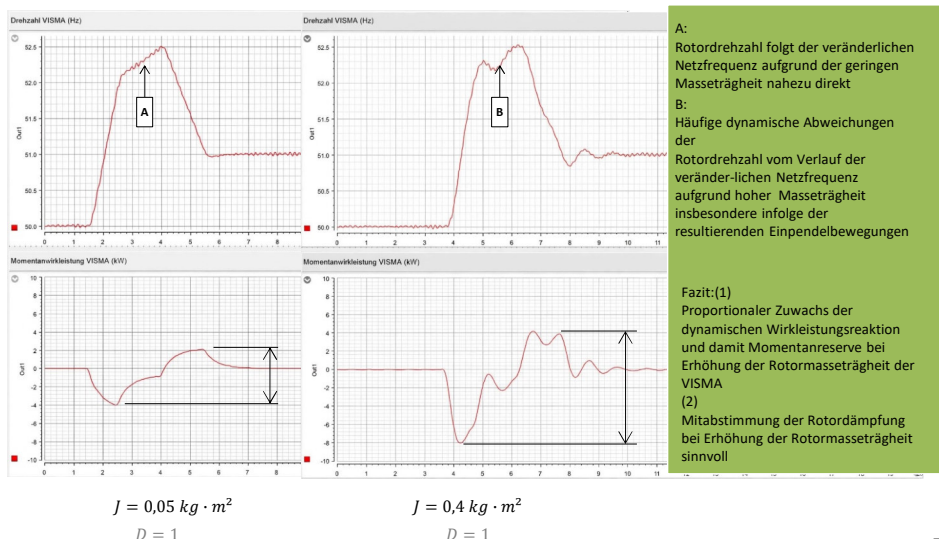
Forum Energie
21. September 2026

25

25

Bereitstellung netzunterstützender Momentanreserve: Wirkleistungsreaktion der VISMA auf Netzfrequenzveränderungen

Momentanreserve in Abhängigkeit der Rotormassenträgheit J bei unveränderter Rotordämpfung D



$$J = 0,05 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$D = 1$$

$$J = 0,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$D = 1$$

Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer
Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme

Forum Energie
21. September 2026

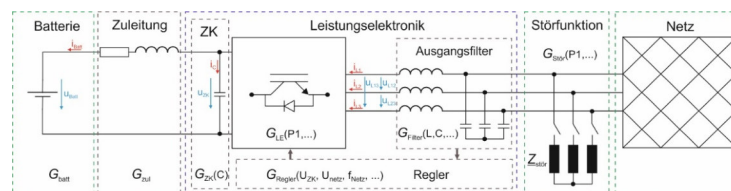
26

26

Wie ist der Einfluss auf die Batterie?

Entwicklung eines Drei-Level-Models

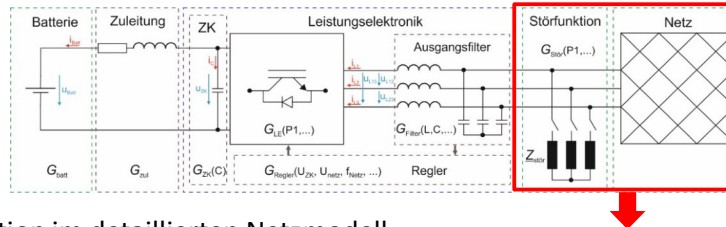
- Wie sind die dynamischen Flüsse zwischen elektrischem Netz-Umrichter-Batterie?



- Entwicklung verschiedener Systemvarianten für unterschiedliche Untersuchungsaspekte

Entwicklung eines Drei-level-Modells

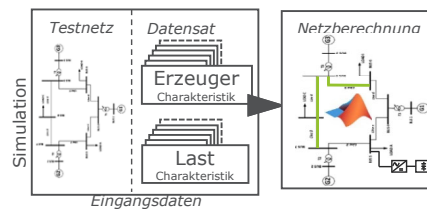
- Wie sind die detaillierten Flüsse zwischen elektrischem Netz-Umrichter-Batterie?



- Zeitsimulation im detaillierten Netzmodell

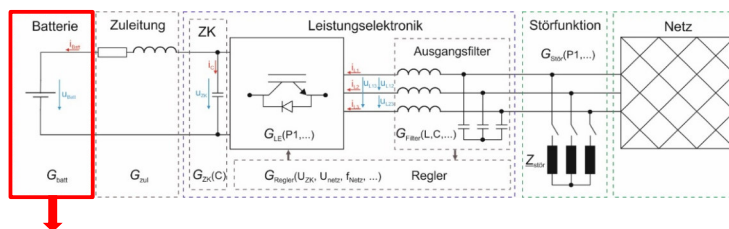
- Störungen:
 - Kraftwerksverlust>Lastverlust
 - Kurzschlüsse
 - Betriebsmittelabschaltungen

- aggregiertes Netzmodell

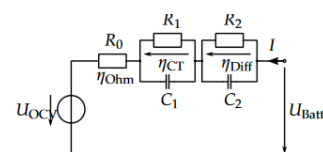


Entwicklung eines Drei-level-Modells

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

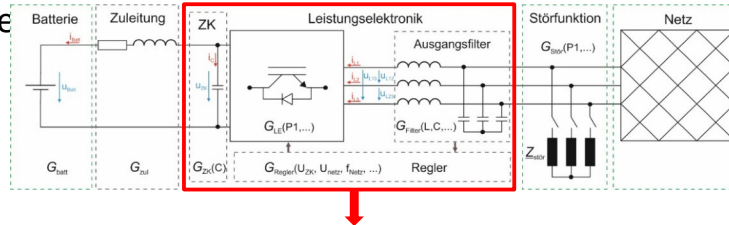


- second-order RC equivalent model
- Parametrierung erfolgt basierend auf Batterietests für unterschiedliche Batteriezelltypen



Entwicklung eines Drei-level-Modells

- Wie sind die dynamischen Flüsse zwischen elektrischem Netz-
Umrichter



- Nachbildung des Umrichters als getaktetes Modell und gemittelt

Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer
Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme

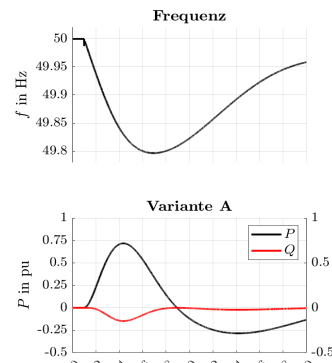
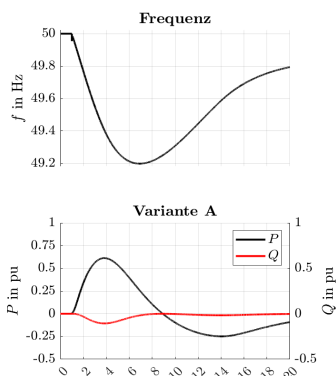
Forum Energie
21. September 2026

31

31

Erste Ergebnisse des Drei-Level Modells

- Umrichter und Netzmodell parametrisiert für volle Leistungsabgabe bei 800 mHz Frequenzabweichung (aktuell)
- Umrichter und Netzmodell parametrisiert für volle Leistungsabgabe bei 200 mHz Frequenzabweichung (Zukunft)



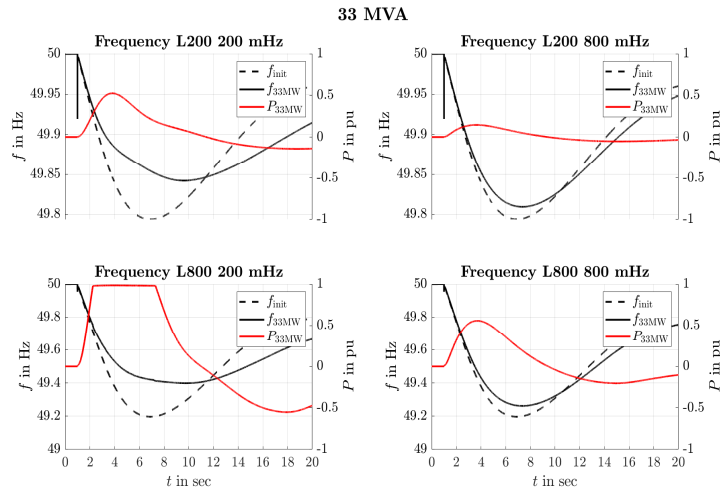
Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer
Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme

Forum Energie
21. September 2026

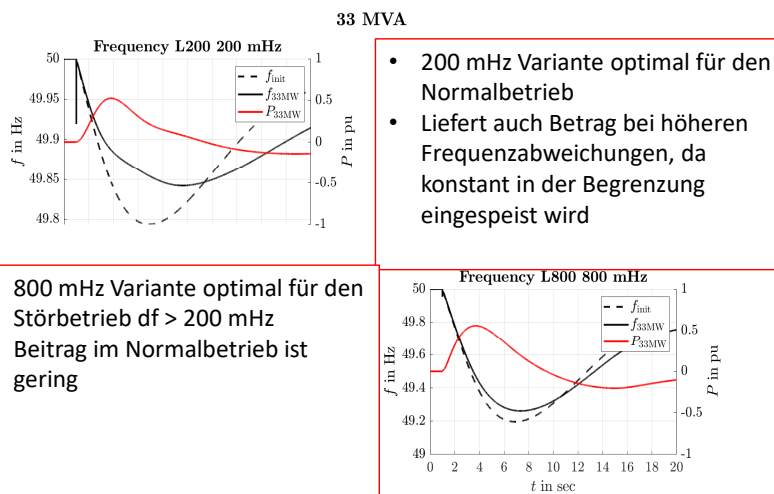
32

32

Vergleich verschiedener Parametervarianten für 33 MVA Batteriespeicher

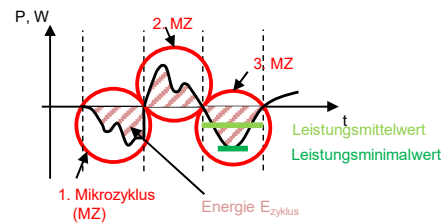
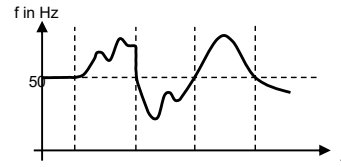


Vergleich verschiedener Parametervarianten für 33 MVA Batteriespeicher

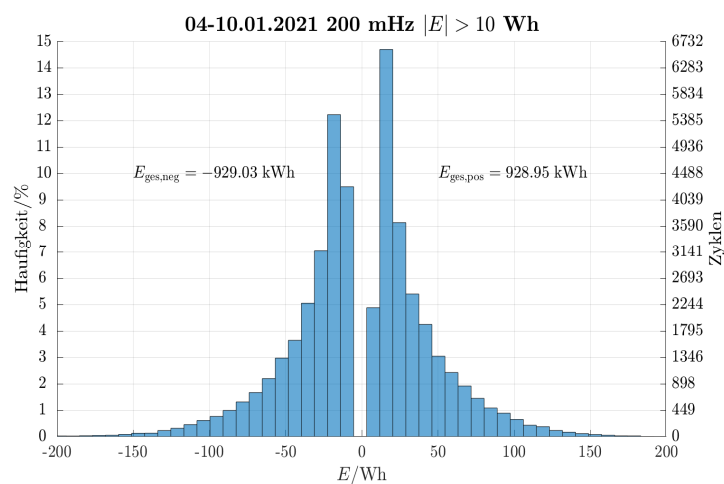


Batteriebelastung: Was kommt in der Batterie an?

- 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
 - P/E Verhältnisse
 - $P_{\min} \setminus E_{\text{zyklus}}$
 - $P_{\text{mean}} \setminus E_{\text{zyklus}}$

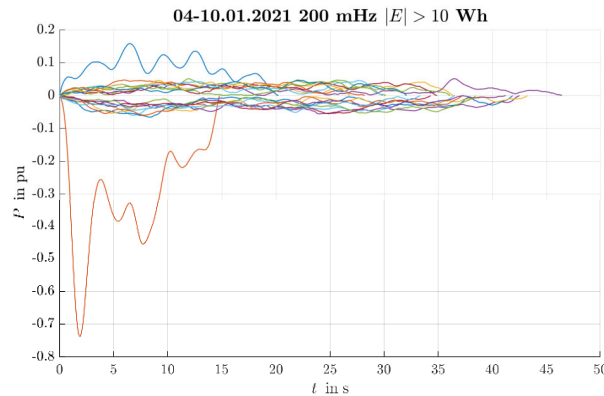


Batteriebelastung: geladene und entlade Energie



- Batterie ist 1MW/100 kWh Batterie
- Sehr geringe Ausnutzung

Batteriebelastung: geladene und entlade Leistung



- Geringe Leistungsabrufe sorgen für hohe Verluste in Batterieumrichter
- P/E Verhältnis sehr hoch
- → Untersuchung eines dritten Parametrierungsansatzes, um die Auslastung der Batterie zu erhöhen

Welche Batterietechnologie ist dafür geeignet?

- Anforderungen an Bereitstellung für Momentanbereitstellung
 - Hohe Zyklenstabilität
 - Hohes P/E Verhältnis → hohe C-Rate
 - Symmetrische Leistungsbereitstellung
 - Leistungsdichte ist relevant
 - Energiedichte zweite Priorität

Cell technologies	Voltage in V	Efficiency in %	Cycles	DOD in %	Costs		C-Rate discharge	C-Rate charge
					Inverter in \$/kW	Battery in \$/kWh		
PbSO ₄	2	85	500	50	450	300	2,5	0,2
NaS	1.92	85	7000	80	450	400	0,15	0,15
NiCd	1.25	80	1000	80	450	1600	2	1
LTO	2.3	92,5	5000	95	450	1000	7.5	5
NCM	3.7	92,5	1500	80	450	420	2	1
FePO ₄	3.2	92,5	2000	80	450	580	5	1
AL-ION	2.3		>20000	ca.100			>20	>20



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!