LANGFRISTSZENARIEN FÜR DIE TRANSFORMATION DES ENERGIESYSTEMS IN DEUTSCHLAND (LFS4)

Vorstellung Vorabanalyse Systemdienstleistungen | 18.11.2025

Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Vorabanalyse: Systemdienstleistungen

- Ausgangslage
  - Stündliche Auflösung in der Energieangebotsmodellierung
  - Stündliche Strombilanzen werden in Enertile zwingend ausgeglichen (Gleichheitsnebenbedingung)
  - Perfect foresight: Die Optimierung kennt und berücksichtigt für die Ausgestaltung des Systems alle Stützjahre und alle Stunden eines Stützjahres zur Laufzeit
  - ➢ Konsequenz: Keine Prognosefehler, keine Abbildung des Regelleistungsmarktes
- Zielsetzung
  - Analyse und Bewertung von Anforderungen an die Systemstabilität in den O45-Szenarien, die in der Modellierung nicht explizit berücksichtigt sind
- Methodik
  - Ex-post Analysen von Zeitreihen bestehender Szenarien
  - Recherche und Anwendung von Heuristiken

Vorabanalyse: Systemdienstleistungen Systemausgleich über Regelreserven

- Unterscheidung in **positive** Regelreserve (Leistungsbilanzdefizit) und **negative** Regelreserve (Leistungsbilanzüberschuss)
- Verschiedene Arten von Regelreserve:
  - **Primärregelreserve**
    Frequency Containment Reserve **FCR**
    - vollständige Aktivierung innerhalb von **30 Sekunden**
    - automatisch, symmetrisch
  - **Sekundärregelreserve**
    automatic Frequency Restoration Reserve **aFRR**
    - vollständige Aktivierung innerhalb von **5 Minuten**
    - automatisch, asymmetrisch
  - **Minutenreserve**, teilweise auch Tertiärregelreserve
    manual Frequency Restoration Reserve **mFRR**
    - vollständige Aktivierung innerhalb von **12,5 Minuten**
    - manuell, asymmetrisch

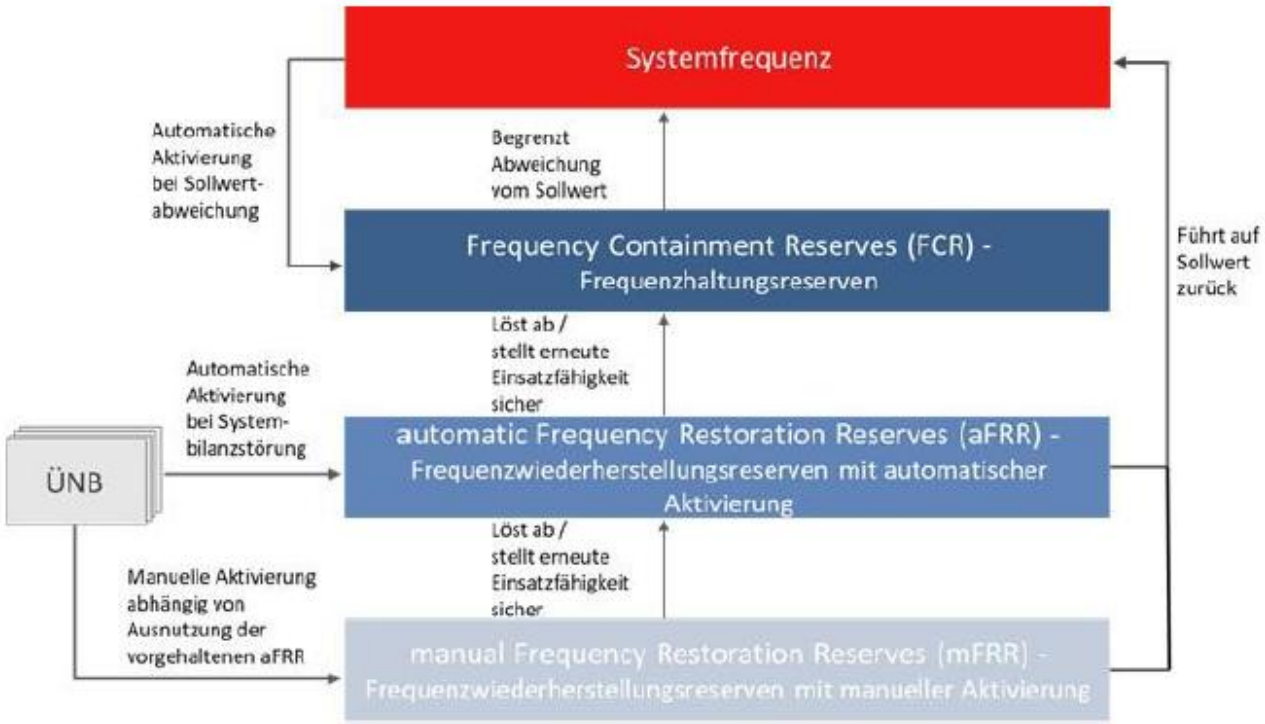


Abbildung 4: Überblick über Einsatz und Aufgaben der verschiedenen Regelreservequalitäten

Bildquelle: Beschreibung von Konzepten des Systemausgleichs und der Regelreservemärkte in Deutschland, Erläuterungsdokument der deutschen Übertragungsnetzbetreiber, Januar 2025

Vorabanalyse: Systemdienstleistungen Regelleistungsmärkte – Bedarf und Angebot

	FCR	aFRR+	aFRR-	mFRR-	mFRR+
Bedarf [MW]	550	2.000	-2.000	-400	900
Angebot [MW]	1.200	4.000	-4.000	-2.000	3.000

- Summe RL-Bedarf in DE ca. +/- 3,5 GW
- RL-Angebot übersteigt Bedarf deutlich

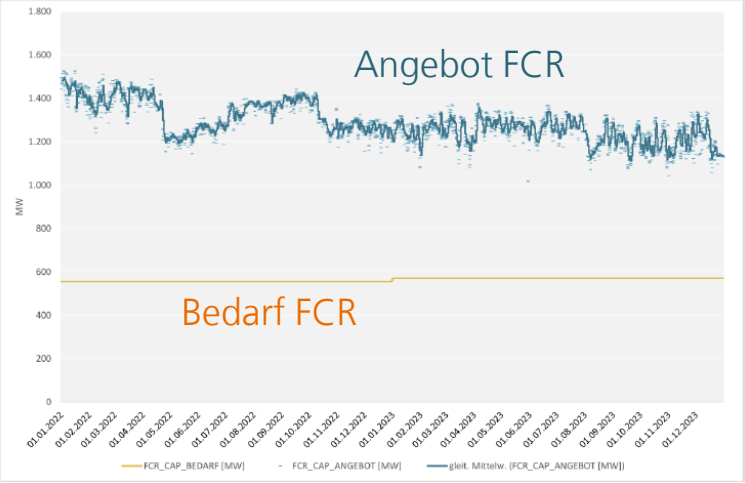


Abbildung 17: FCR-Bedarf und -Angebot (symmetrisches Produkt)

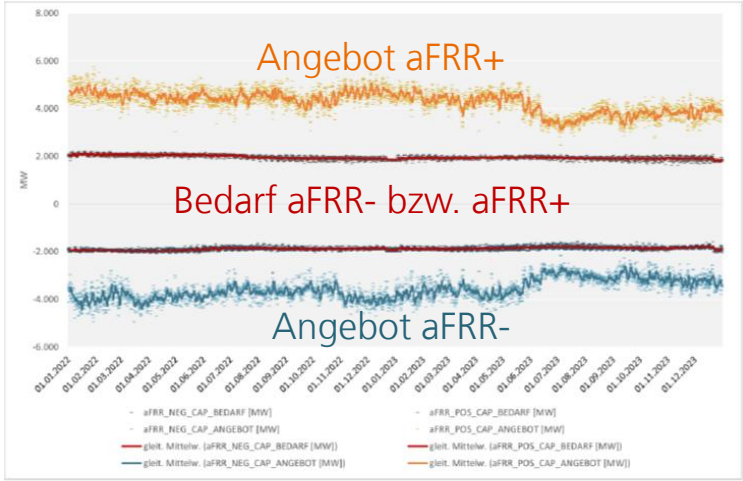


Abbildung 18: aFRR-Bedarf und -Angebot am Regelleistungsmarkt

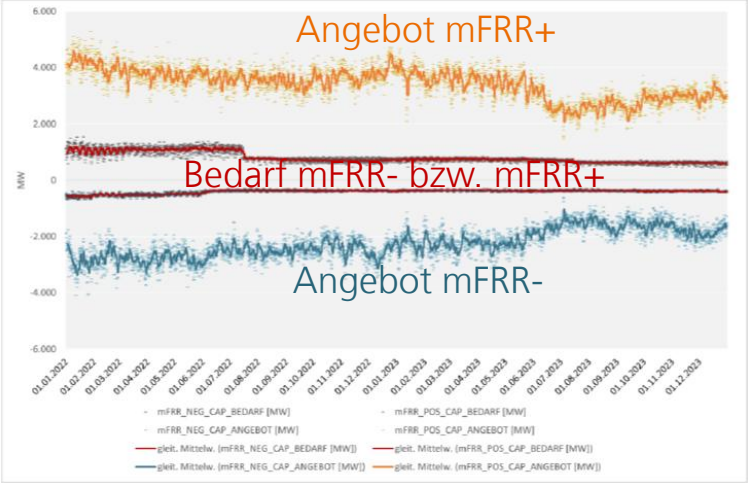


Abbildung 19: mFRR-Bedarf und -Gebotsüberhang am Regelleistungsmarkt

Bildquelle: Beschreibung von Konzepten des Systemausgleichs und der Regelreservemärkte in Deutschland, Erläuterungsdokument der deutschen Übertragungsnetzbetreiber, Januar 2025

Vorabanalyse: Systemdienstleistungen Präqualifizierte Anbieter für Regelreserve

- Anbieter in DE
  - FCR 29 Anbieter
  - aFRR 30 Anbieter
  - mFRR 27 Anbieter
- Die Präqualifikation einer Anlage für mehrere Regelleistungsprodukte ist möglich
- Anbieter dürfen präqualifizierte Leistungen flexibel in beliebig viele, unterschiedlich bepreiste Leistungsscheiben aufteilen und über verschiedene Regelleistungsprodukte vermarkten, solange keine Leistungsscheibe doppelt vermarktet wird

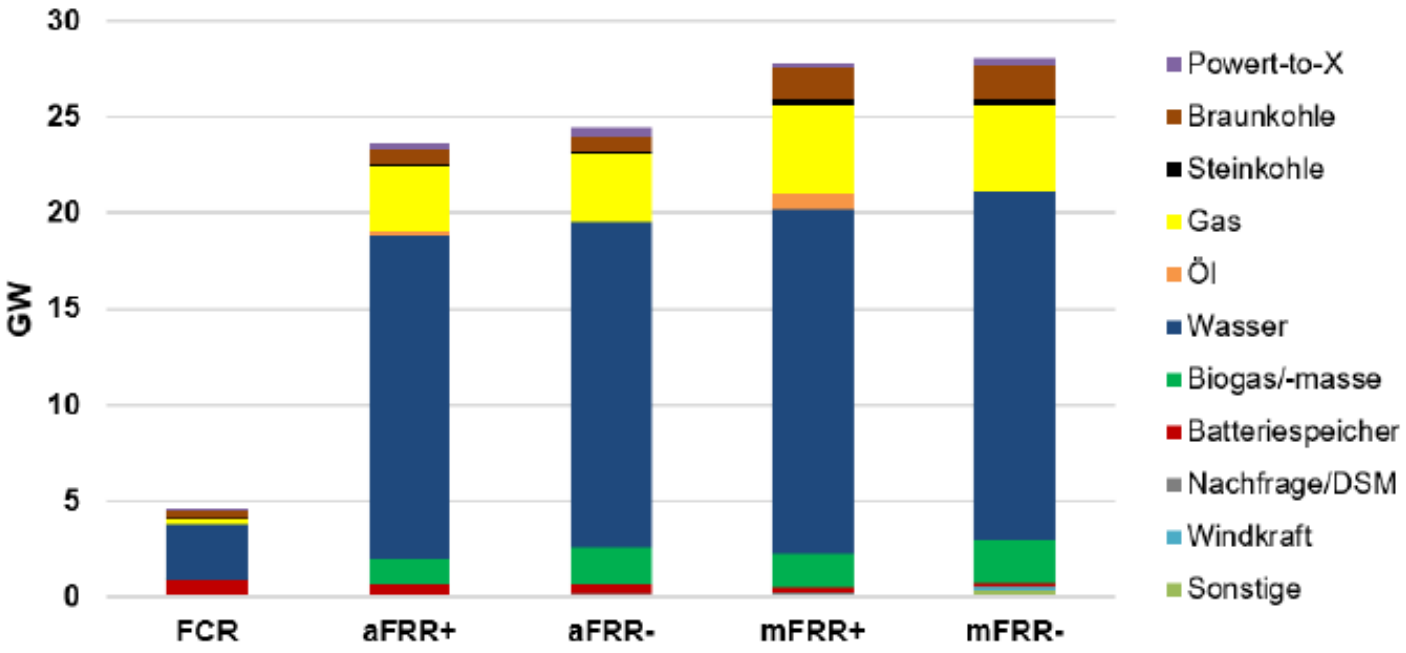


Abbildung 7: Präqualifizierte Leistung (in GW) in Deutschland differenziert nach Erzeugungstechnologien und Richtung (Quelle: Regelleistung.net – Stand: Q4/2024)

Bildquelle: Beschreibung von Konzepten des Systemausgleichs und der Regelreservemärkte in Deutschland, Erläuterungsdokument der deutschen Übertragungsnetzbetreiber, Januar 2025

Vorabanalyse: Systemdienstleistungen Prognosen zum Bedarf nach Regelreserve

„Unter Berücksichtigung aller Faktoren und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten gehen die ÜNB eher von einer **Erhöhung des Bedarfes** nach Regelreserve bis 2030 aus. „

Einflussfaktor	Erwartete Auswirkung
Kohle- und Atomausstieg	↓
EE-Offshore-Zubau und große EE-Onshore-Parks	↑
EE-Zubau und EE-Rückbau (kleinere und größere Anlagen und Parks)	↑↑
Bidding-Zone-Split	↑↑
HGÜ zu anderen Synchrongebieten	↑
E-Mobilität / Heim-Speicher / Eigenbedarfsoptimierung	↑
Wasserstoff-Initiativen / Intelligentes Lastmanagement (VNB)	↑
Regulatorischer Rahmen (z. B. RD2.0)	↑↓
Passive Balancing	↑↓
Europäische Regulierung / CEP	↓
Dimensionierungsverfahren	-

Quelle: Regelreserveprozesse 2030, Das Grünbuch der deutschen Übertragungsnetzbetreiber für die Regelreserve, 16.12.2024, Berlin, Dortmund, Bayreuth, Stuttgart

Vorabanalyse: Systemdienstleistungen
Abschätzung zum Bedarf nach Regelreserve, 1. Ansatz

Leistung in GW	2025	2030	2035	2040	2045
Gesamterzeugungsleistung	246	430	587	706	723
Quotient	1.4%	1.4%	1.4%	1.4%	1.4%
Bedarf Regelleistung	3.5	6.1	8.4	10.0	10.3
Quotient (nach Anteil EE)	1.4%	1.6%	1.7%	1.7%	1.7%
Bedarf Regelleistung (nach Anteil EE)	3.5	7.0	10.0	12.0	12.0

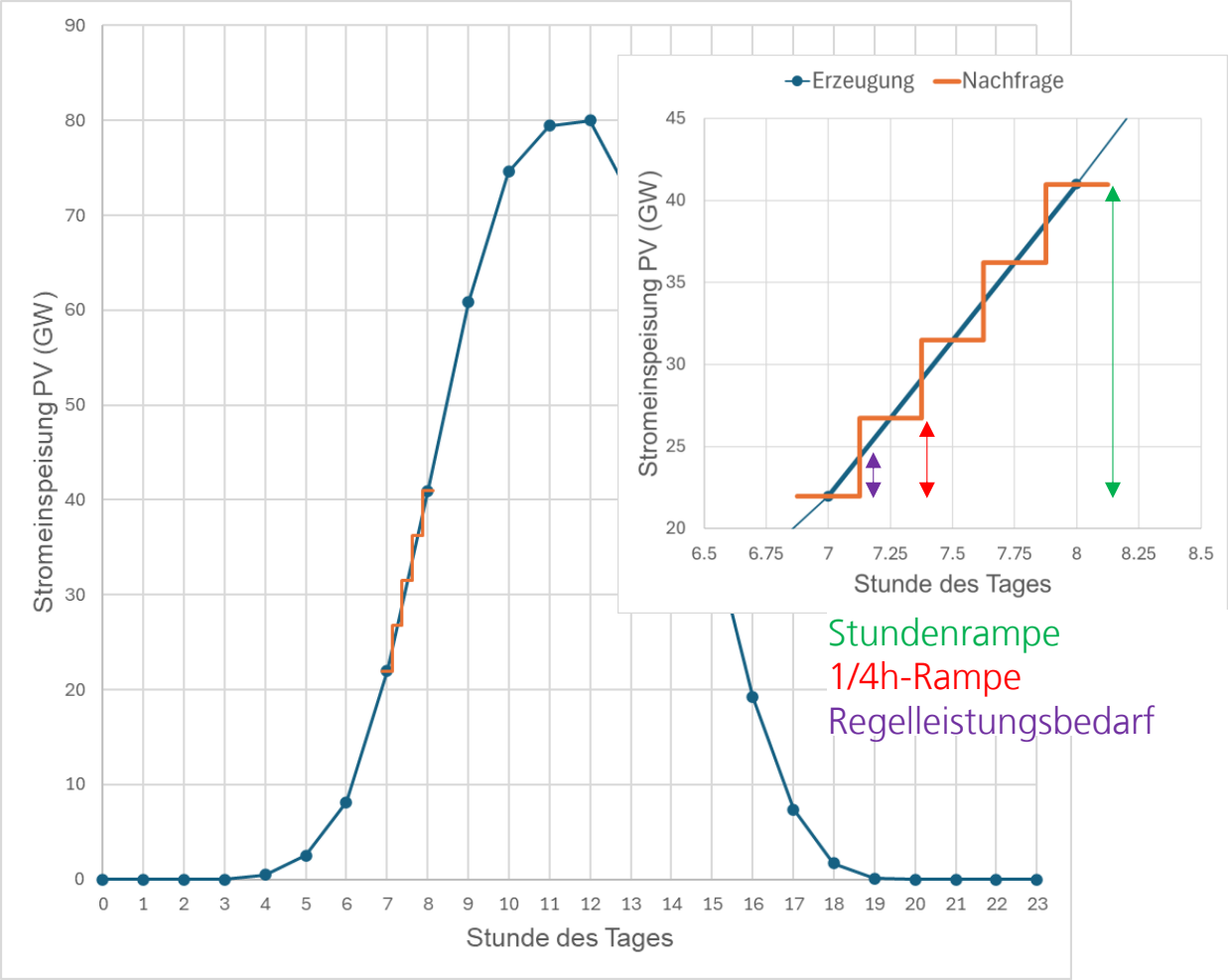
Annahme

- Regelleistungsbedarf steigt mit steigender Erzeugungsleistung
- Im dynamischen Fall zusätzlich Anstieg der Regelleistungs-Quote von 1.4 auf 1.7% bis zum Jahr 2045 durch steigenden Anteil EE an der Gesamterzeugungsleistung

Schlussfolgerungen

- Regelleistungsbedarf nach diesem Ansatz ab 2040 bei etwa 10-12 GW (O45-Strom)

Vorabanalyse: Systemdienstleistungen
Abschätzung zum Bedarf nach Regelreserve, 2. Ansatz



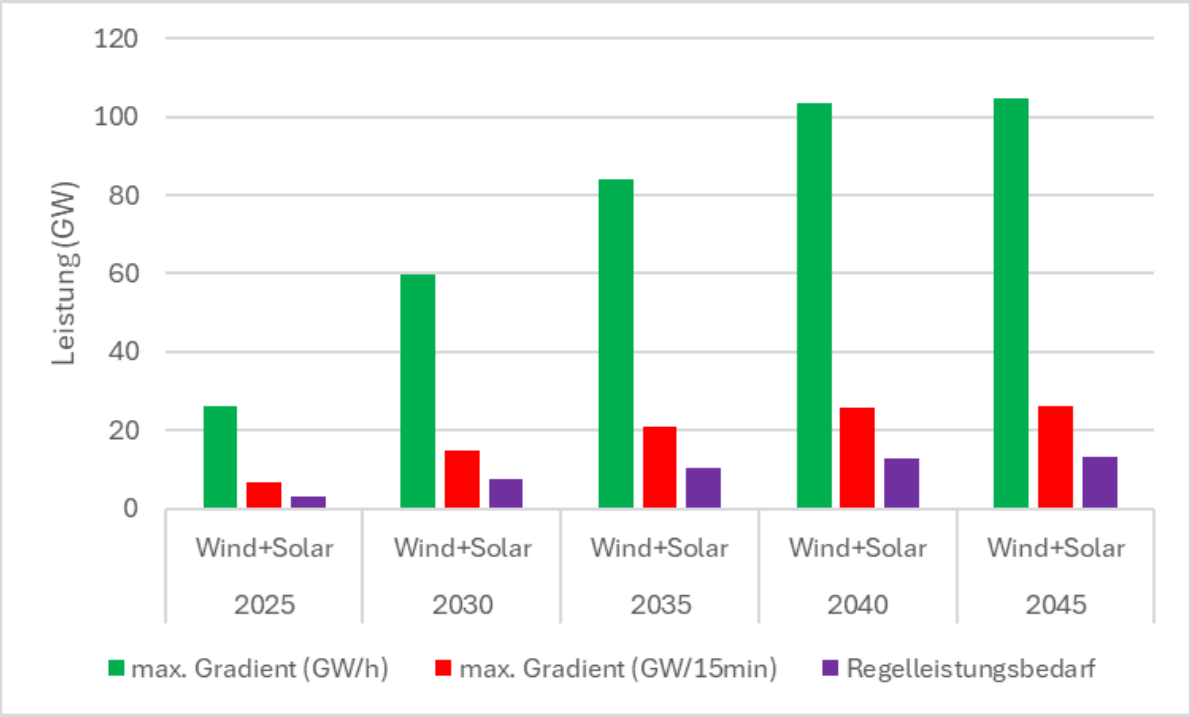
Erkenntnisse

- Steilste Erzeugungsrampe zwischen 7 und 8 Uhr (auch bei gemeinsamer Betrachtung von Windenergie und PV)
- Im Extremfall ergibt sich ein treppenstufenförmiger Verlauf der Nachfragekurve mit nahezu instantaner Veränderung der Nachfrage von einem 1/4h-Wert zum nächsten
- Der Regelleistungsbedarf entspricht dann etwa 50% der 1/4h-Rampe der Erzeugung

Einordnung

- Innerstündliche Leistungsbedarfe in Enertile nicht erfasst
- Regelleistungsbedarf könnte durch höhere zeitliche Granularität der Strommärkte reduziert werden

Vorabanalyse: Systemdienstleistungen
Abschätzung zum Bedarf nach Regelreserve, 2. Ansatz



Erkenntnisse

- Steilste Erzeugungsrampe zwischen 7 und 8 Uhr (auch bei gemeinsamer Betrachtung von Windenergie und PV)
- Regelleistungsbedarf entspricht etwa 50% der 1/4h-Rampe

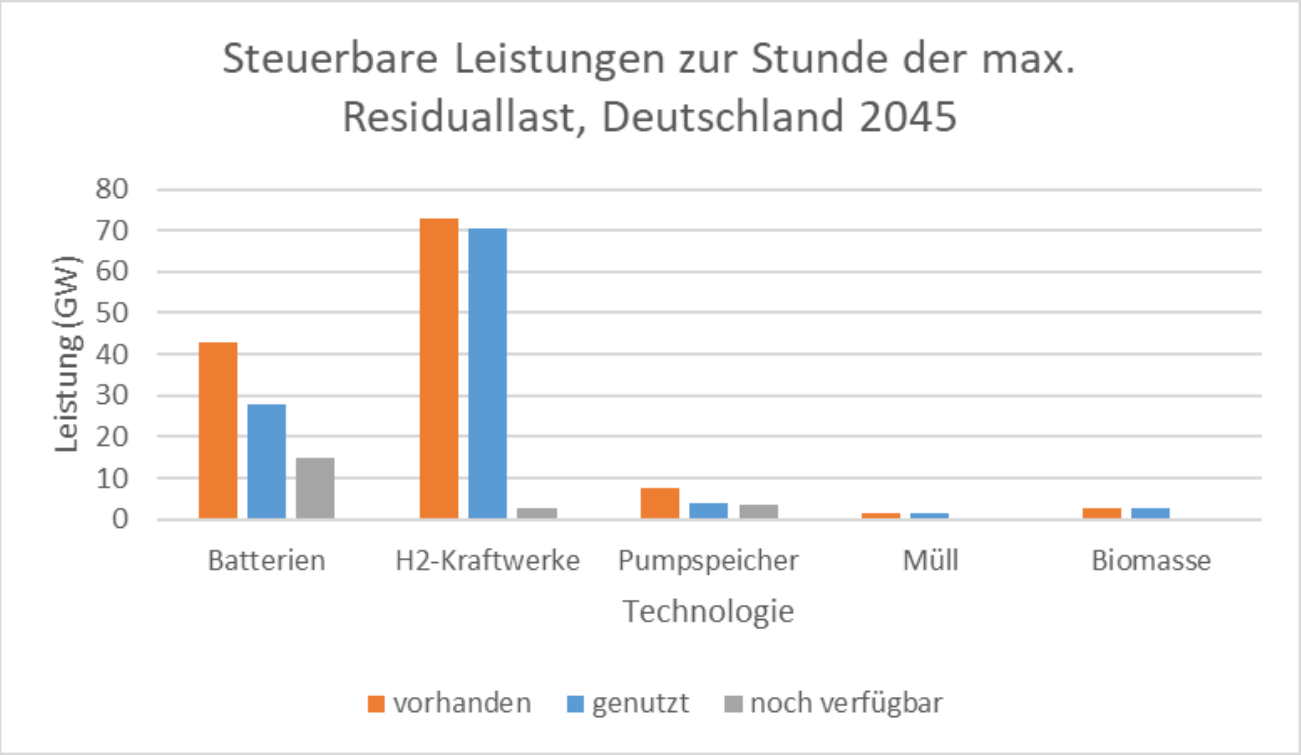
Einordnung

- Innerstündliche Leistungsbedarfe in Enertile nicht erfasst
- Regelleistungsbedarf könnte über höhere zeitliche Granularität der Strommärkte reduziert werden

Schlussfolgerungen

- Regelleistungsbedarf nach diesem Ansatz ab 2040 bei etwa 13 GW (O45-Strom)

Vorabanalyse: Systemdienstleistungen
Abdeckung Regelleistung zum Zeitpunkt max. Residuallast



Erkenntnisse

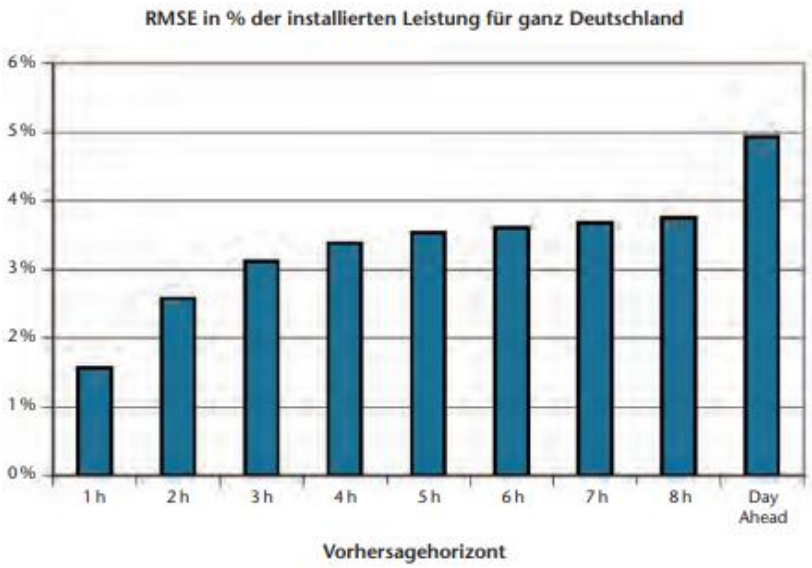
- Verfügbare steuerbare Leistungen zum Zeitpunkt der maximalen Residuallast sind stark begrenzt, aber noch nicht vollständig ausgeschöpft

Einordnung

- Bei vorhandener Leistung 90% Verfügbarkeit der Anlagen berücksichtigt
- Batteriespeicher werden nicht modellendogen ausgebaut

Vorabanalyse: Systemdienstleistungen EE-Prognosefehler

Technologie	Fehlerquellen	Prognosefehler
Windenergie	lokale Windverhältnisse, Turbulenzen	1.5-10% [1,2]
Photovoltaik	Wolkenbewegung, Aerosole, Schneeabdeckung	2-7% [2]
Wasserkraft	Laufwasser: Niederschlagsprognosen	2%
Biomasse	Brennstoffverfügbarkeit	<1%

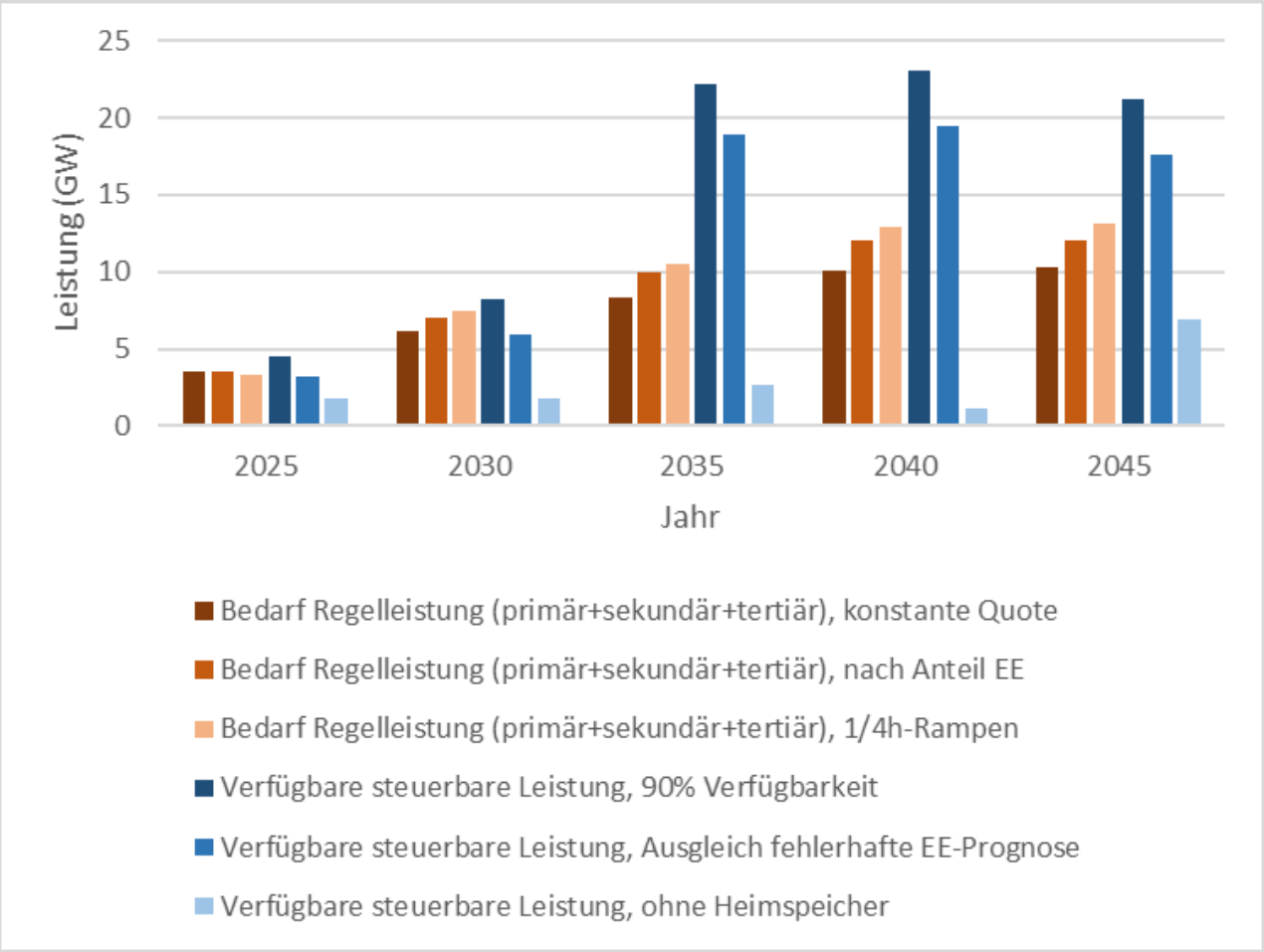


Erkenntnisse

- Besonders Windenergie und Photovoltaik von Prognosefehler betroffen
- Prognose unschärfer, je weiter im Voraus
- Für große Gebiete gleichen sich zeitlich und räumlich variable Prognosefehler aus, verringerter Gesamtfehler
- Prognosefehler für einzelne Anlagen können deutlich höher ausfallen
- Prognosefehler sind auf installierte Leistung bezogen, Fehler auf mittlere eingespeiste Leistung entsprechend höher

1 Quelle: Foley et al., Current methods and advances in forecasting of wind power generation, Renewable Energy, Volume 37, Issue 1, 2012, https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.05.033.
2 Quelle : Lange et al., Prognosen der zeitlich-räumlichen Variabilität von Erneuerbaren, Fraunofer IWES, ZSW, 2011

Vorabanalyse: Systemdienstleistungen
Abdeckung Regelleistung zum Zeitpunkt max. Residuallast



Erkenntnisse

- Das System ist in den frühen Stützjahren knapp bemessen, insbesondere unter Berücksichtigung fehlerhafter EE-Prognosen
- Ab 2035 durch Batteriespeicher noch ausreichend steuerbare Leistung im System
- Allerdings zum Großteil Heimspeicher, die ggf. nicht für die Regelleistung zur Verfügung stehen

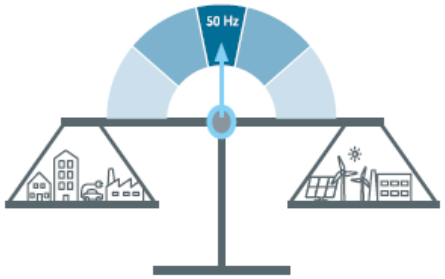
Einordnung

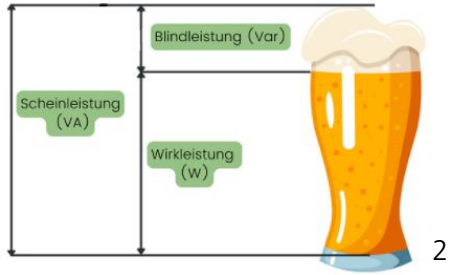
- Mobile Batteriespeicher und Bereitstellung von Regelleistung aus dem Ausland hier nicht berücksichtigt

Schlussfolgerungen

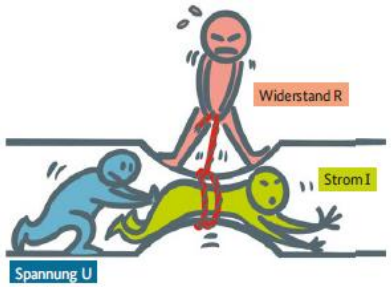
- Bei Nicht-Verfügbarkeit von mobilen oder Heim-Batteriespeichern sind im Jahr 2040 9-12 GW Regelleistung nicht gedeckt

Vorabanalyse: Systemdienstleistungen
Weitere Themen der Systemstabilität





2



- **Frequenz:**
  - Heute: Generatoren mit rotierenden Massen
  - Zukunft: Z.B. durch netzbildende Wechselrichter
  - Erhaltung der Frequenz v.a. mit Momentanreserve adressiert → Consentec
- **Spannung/Blindleistung:**
  - Heute: Blindleistung wird durch konventionelle Kraftwerke bereitgestellt
  - Zukunft: EE-Anlagen, können durch Einstellung des Phasenwinkels zwischen Strom und Spannung auch Blindleistung bereitstellen
- **Kurzschlussstrom:**
  - Heute: Kurzschlussstrom (Netzschutzkonzept) wird von den Generatoren der konventionellen Kraftwerke gespeist
  - Zukunft: Netzbildende Stromrichter in Kombination mit Transformatoren oder rotierenden Phasenschiebern
- **Resonanzstabilität:**
  - Problem: Mit Zunahme von stromrichterbasierten Anlagen nehmen Wechselwirkungen zu
  - Lösung: Dämpfend wirkende leistungselektronische Komponenten
  - Höhere Kurzschlussleistung wirkt sich ebenfalls positiv auf die Resonanzstabilität aus

- **Fazit:**
  - Technische Ansätze für stromrichterbasierte Anlagen existieren, Details für zukünftiges Energiesystem noch zu klären
  - Auswirkungen auf Technologiemix und damit Relevanz für die Energieangebotsmodellierung in Enertile eher gering

1 Quelle: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Roadmap Systemstabilität, 2023
2 Quelle: https://gruenes.haus/wirkleistung-wechselrichter/ (abgerufen am 19.05.2024)

Vorabanalyse: Systemdienstleistungen

- Schlussfolgerungen
  - Regelleistungsbedarfe in Enertile nicht berücksichtigt, müssen bei Systemplanung bedacht werden
  - Enertile sieht innerstündliche Leistungsrampen nicht, Leistungsbedarf wird möglicherweise unterschätzt
  - Prüfung und Analyse zum Zeitpunkt max. Residuallast zeigt, dass System unter folgenden Bedingungen dennoch ausreichend dimensioniert ist
    - Heim-Batteriespeicher sind als Flexibilität im Regelleistungsmarkt verfügbar
    - alternativ sind mobile Batteriespeicher (eFlotte) im entsprechenden Umfang verfügbar
    - ansonsten entsteht ein Bedarf nach etwa 9-12 GW zusätzlicher flexibler Leistung

- Auswirkungen auf die nächste Szenarienrunde:
  - Ex-post Prüfung der innerstündlichen Leistungsrampen
  - Prüfung der Möglichkeit, weitere Nebenbedingung einzuführen, die Leistungsbedarf durch 1/4h-Rampen berücksichtigt