



Fakultät Versorgungstechnik

## **Hausarbeit**

im Modul Regenerative Energietechnik

zum Thema

### **Die Energiewende – Wo befinden sich Kraftwerksreserven in Deutschland?**

vorgelegt von: Moritz Deckert, 70455296  
Fynn Linnenbrügger, 70468167  
Studiengang: Energie- und Gebäudetechnik

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Oliver Büchel  
Prof. Dr. Matthias Puchta

Abgabedatum: XY.01.2023



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Wie kann der Begriff Kraftwerksreserve definiert werden?</b>	<b>3</b>
2.1	Wie funktioniert der deutsche Strommarkt?	3
2.2	Kraftwerksreserven zur Netzfrequenzstabilisierung	5
2.3	Kraftwerksreserven zur Reserveleistungsvorhaltung	7
<b>3</b>	<b>Bewertung der Kraftwerksreserven zur Netzstabilisierung und Reserveleistungsvorhaltung</b>	<b>7</b>
3.1	Bewertung nach gesetzlichen Gesichtspunkten	7
3.2	Bewertung nach logistischen Gesichtspunkten	7
3.3	Bewertung nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten	7
3.4	Was bedeutet der Atom- und Braunkohleausstieg für die Kraftwerksreserven?	7
3.5	Auswirkungen des Ausbaus der erneuerbaren Energien auf die Kraftwerksreserven	7
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>Literatur</b>	<b>8</b>
<b>6</b>	<b>Anhang</b>	<b>9</b>

## Abbildungsverzeichnis

2.1	Strompreisbildung an der Börse nach dem Merit-Order-Prinzip (Reit- sam 2022)	4
2.2	Regelzonen und Übertragungsnetzbetreiber in Deutschland (Wawer 2022)	5
2.3	Beispielhafte Darstellung der Regularbeit in Abhängigkeit der Netz- frequenz (Wawer 2022)	6
2.4	Beispielhafte Darstellung der Regularbeit in Abhängigkeit der Netz- frequenz (Wawer 2022)	6

## Tabellenverzeichnis

2.1	Merkmale der unterschiedlichen Regelenergiearten	7
-----	--	---



## 1 Einleitung

Um den Begriff der Kraftwerksreserve besser einzuordnen, folgt eine kurze zeitliche und thematische Einordnung warum die Reserven, gerade aktuell, eine so große Rolle spielen. Das Thema Versorgungssicherheit rückt nicht zuletzt durch den anhaltenden Ukrainekonflikt in den Fokus der Leitmedien. Die unregelmäßigen Gaslieferungen aus Russland bedrohen die deutsche Versorgungssicherheit im Hinblick auf Wärme und Strom. Darüberhinaus steigen dadurch die Preise für Energie in ungeahnte Höhen. Der daraufhin steigende Verkauf an elektrischen Heizlüftern, begründet durch die Angst, dass im Winter kein Gas mehr zur Verfügung steht, kann eine zusätzliche Belastung für das deutsche Stromnetz darstellen. Frankreich, welches vorrangig Strom aus Atomkraftwerken bezieht, kann aus Gründen der mangelnden Kühlung und versäumten Wartungsarbeiten aus der Corona Krise, bislang kaum Strom exportieren. Hinzu kommt die Energiewende, in welcher die fossile Stromproduktion auf erneuerbare umgestellt werden soll. Die Volatilität von erneubaren Energiequellen stellt das Stromnetz sowie die -erzeugung vor enorme Herausforderungen.

In der folgenden Projektarbeit im Seminar „Regenerative Energietechnik“ wird untersucht, inwiefern auftrende Differenzen zwischen Stromangebot- und -nachfrage mit Hilfe der deutschen Kraftwerksreserven ausbalanciert werden können und wo sich diese befinden. Im ersten Teil wird der Begriff der Kraftwerksreserve genauer beleuchtet, da es unterschiedliche Arten von Reserven gibt. Darüberhinaus wird das Funktionsprinzip des Strommarkts dargestellt, um die Unterschiede der Reserven zu begründen. Der zweite Teil beschäftigt sich mit der Bewertung von Kraftwerksreserven unter gesetzlichen, logistischen sowie wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Im Anschluss wird Bezug auf die Bedeutung des Atom- und Braunkohleausstiegs für die Kraftwerksreserven Bezug genommen. Zuletzt werden positive und negative Auswirkungen auf den Ausbau der erneuerbaren Energien erläutert.



## **2 Wie kann der Begriff Kraftwerksreserve definiert werden?**

Da der Begriff Kraftwerksreserve nicht genau definiert ist, wird im Folgenden auf die unterschiedlichen Arten der Kraftwerksreserven eingegangen. Grundlage bildet der Strommarkt, welcher in Kapitel 2.1 behandelt wird. Aufgrund der Folgen des Ukraine Konflikts ist ebenfalls eine weitere Art der Reserve hinzugekommen.

### **2.1 Wie funktioniert der deutsche Strommarkt?**

In Deutschland gibt es einen Energy-Only-Market (EOM). Dies bedeutet, dass ausschließlich der tatsächlich produzierte Strom gehandelt wird. Anders wäre dies bei dem viel diskutierten Kapazitätsmarkt, indem auch vorgehaltene Leistungen für z.B. Dunkelflaute vergütet werden (haucap). Die Preisbildung folgt dem Prinzip der Merit-Order (s. Abb. 2.1). In der Merit-Order werden alle Stromproduzenten, welche zu gegebenen Zeitpunkt ihren Strom am Markt anbieten, nach ihren jeweiligen Grenzkosten aufsteigend aufgelistet. Der Stromerzeuger mit den geringsten Grenzkosten, darf als erstes einspeisen und nach ihm derjenige mit den nächst größeren Grenzkosten. Als Grenzkosten werden die Erzeugungskosten für die auf dem Markt genau angebotene Strommenge bezeichnet. Der Stromproduzent, welcher mit seiner angebotenen Strommenge Angebot und Nachfrage deckt, legt den zu vergüteten Strompreis für alle anderen Marktteilnehmer in der Merit-Order unter ihm fest. Dieses Kraftwerk heißt Grenzkostenkraftwerk. In Abbildung 2.1 ist die Reihenfolge der Stromerzeugungsart und den typisch zu erwartenden Grenzkosten dargestellt.

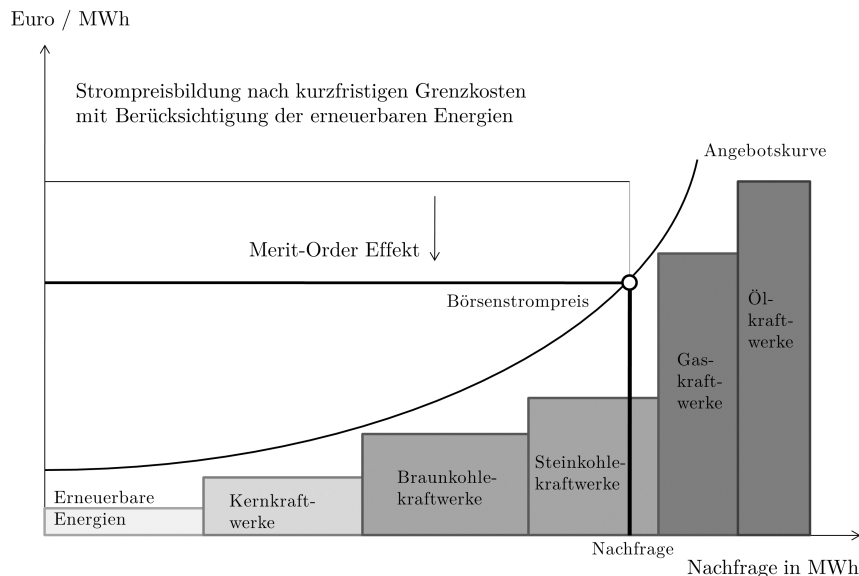


Abb. 2.1: Strompreisbildung an der Börse nach dem Merit-Order-Prinzip (Reitsam 2022)

In der Merit-Order weist die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien Grenzkosten von nahezu Null auf. Die Folge des Ausbaus von erneuerbaren Energien ist, dass konventionelle Kraftwerke mit hohen Grenzkosten, vor allem Gas- und Ölkraftwerke, in der Reihenfolge nach rechts gerückt werden (Merit-Order-Effekt, s. Abb. 2.1). Das Verdrängen der Gas-, Öl- sowie Pumpspeicherkraftwerke führen zu einem sinkenden Strompreis an der Böse (Wirth 2022). Dadurch sind diese Kraftwerke nur bei mangelndem Wind und mangelnder Sonneneinstrahlung an der Stromproduktion beteiligt. Für den Strompreis bedeutet dies teilweise erhebliche Schwankungen je nach aktueller Wetterlage und geringe bzw. unvorhersehbare Betriebsstunden der genannten Kraftwerke. Damit werden die Anreize gut und schnell regelbare Gaskraftwerke zu errichten und wirtschaftlich betreiben zu können deutlich eingedämmt, obwohl die Kraftwerksleistung ohne Vergütung vorgehalten wird (Wirth 2022). Gegensätzlich dazu verlangt der Ausbau regenerativer Stromerzeuger einen Zuwachs gut und schnell regelbarer Gaskraftwerke (Reitsam 2022).

Die Forderung eines Kapazitätsmarkts, indem auch vorgehaltene Kraftwerksleistung bepreist wird, gewinnt dahingehend an Bedeutung. Den Kraftwerksbetreibern fällt es zunehmend schwer ihre konventionellen Kraftwerke aufgrund der bereits erörterten fehlenden Betriebsstunden rentabel zu betreiben. Auch ohne weiteren Ausbau von erneuerbaren Energien wird bei Dunkelflauten gerade in den wenig sonnigen Wintermonaten Januar und Februar weiterhin Residuallast gebraucht. Konträr dazu wurde in der EEG-Nobelle aus dem Jahr 2014 eine strategische Kraft-



werksreserve aus Braunkohlekraftwerken entschieden (BMWi).

## 2.2 Kraftwerksreserven zur Netzfrequenzstabilisierung

Die Kraftwerksreserven zur Netzfrequenzstabilisierung fallen unter den Begriff des Regelenenergiemarkts. Aufgrund des liberalisierten Strommarkts besitzen die Übertragungsnetzbetreiber keine eigenen Kraftwerke, sodass für die Stabilisierung Verträge mit Energieversorgungsunternehmen (EVU) geschlossen werden müssen.

Unter Regelenenergie versteht man zum einen die Reservierung von Kraftwerksreserven bzw. -kapazitäten (Regelleistung) und zum anderen den Ausgleich von Regelzonenungleichgewichten (Regelarbeit) (Wawer 2022). Da es im Stromnetz zu negativen und positiven Abweichungen der Frequenz kommen kann, wird zur Kompensation sowohl positive und negative Regelarbeit benötigt. Anders als bei der Regelleistung wird eine gelieferte Strommenge in MWh vergütet. Um Unterschiede zwischen Angebot und Nachfrage unter den vier deutschen Regelzonen zu decken, wird eine Reservierung von Kraftwerksreserven erforderlich (Regelzonen s. Abb. 2.2). In diesem Fall erfolgt eine Bezahlung der Kraftwerke unabhängig von der gelieferten Strommenge und Einsatzzeit (Wawer 2022). Die Bezahlung ist als eine Art Entschädigung für das Vorhalten von Kraftwerkskapazitäten, gegebenenfalls nicht Abrufen und den damit verbundenen Fixkosten der Einsatzbereitschaft zu verstehen.

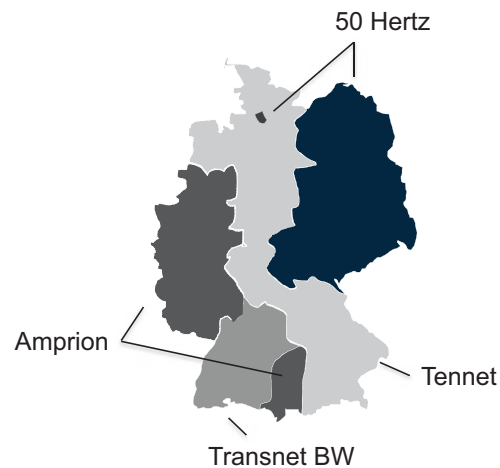


Abb. 2.2: Regelzonen und Übertragungsnetzbetreiber in Deutschland (Wawer 2022)

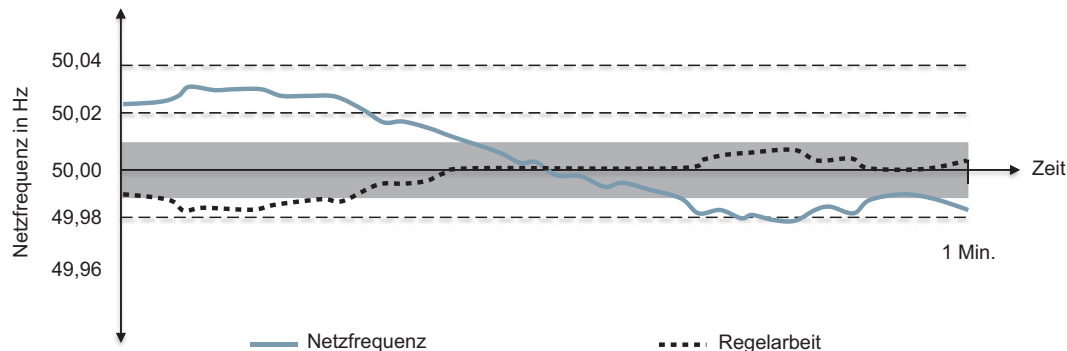


Abb. 2.3: Beispielfhafte Darstellung der Regularbeit in Abhängigkeit der Netzfrequenz (Wawer 2022)

Um die Frequenz von 50 Hz im deutschen und europäischen Stromnetz stabil zu halten, muss ständig Regularbeit eingesetzt werden. Für das ständige Abrufen dieser Regularbeit wird Regelleistung gebraucht. Für die Netzfrequenz gibt es eine zulässige Schwankungsbreite von  $\pm 0,2$  Hz (Angerer und Krohns). Bei einer zu geringen Netzfrequenz ist zu wenig Strom im Netz aufgrund von zu großer Abnahme oder Produktionsausfällen seitens der Stromerzeuger. In diesem Zuge gibt es Marktteilnehmer, welche zusätzliche Reserven bzw. Kapazitäten anbieten oder Stromverbraucher, die ihren eigenen Verbrauch drosseln. Gegenätzlich dazu ist eine zu hohe Netzfrequenz auf zu viel Strom im Netz zurückzuführen. In diesem Fall wiederum können Stromverbraucher diesen erhöhen oder Stromerzeuger ihre Kraftwerksleistung herunterfahren. In Abbildung 2.2 ist die Abhängigkeit der Regularbeite von der Netzfrequenz dargestellt.

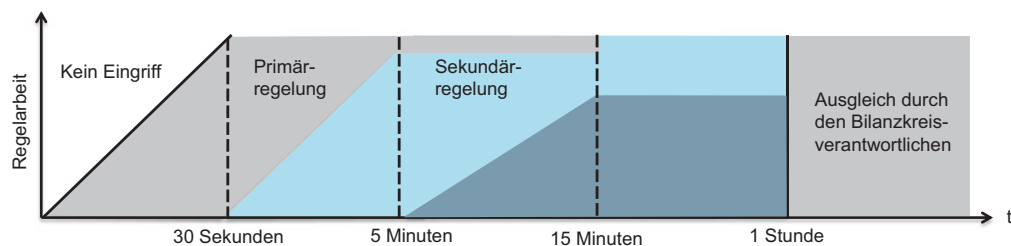


Abb. 2.4: Beispielfhafte Darstellung der Regularbeit in Abhängigkeit der Netzfrequenz (Wawer 2022)

Für die beschriebenen Mechanismen gibt es im Wesentlichen drei Regelennergien, die Primär-, Sekundärregelenergie und die Minutenreserve. Die Abbildung 2.2 zeigt Regelennergiearten in ihrer Einsatzreihenfolge und Reaktionsschnelligkeit zur Stabilisierung der Netzfrequenz.



Der Eingriff durch die Primärregelung erfolgt unmittelbar nach Über- sowie Unterschreitung des zulässigen Frequenzbereichs. Innerhalb von 30 s muss die komplette Regelleistung abrufbar sein und volle Regelarbeit liefern.

Tab. 2.1: Merkmale der unterschiedlichen Regelenenergiearten

Regelenenergieart	Primärregelung	Sekundärregelung	Minutenregelung
Bereitstellung durch	ENTSO-E	ÜNB	ÜNB
Aktivierung	Frequenzgesteuert: Eigenständige Messung/Eingriff vor Ort durch Anbieter	Durch verantwortlichen ÜNB - löst automatisch PRL ab	Durch v - löst a
Volle Leistung	Innerhalb von 30	Innerhalb von 5	Innerha
Abzudeckender Zeitraum nach Störfall	0 bis 15	ab 30 bis 15	ab 15 b
Vergütung	Leistungspreis	Leistungs- und Arbeitspreis	Leistun
Mindestangebots-größe	Ab	positiv oder negativ	positiv
Tägliche Produkte	Positiv und negativ	Positiv und negativ	Positiv

### 2.3 Kraftwerksreserven zur Reserveleistungsvorhaltung

## 3 Bewertung der Kraftwerksreserven zur Netzstabilisierung und Reserveleistungsvorhaltung

### 3.1 Bewertung nach gesetzlichen Gesichtspunkten

### 3.2 Bewertung nach logistischen Gesichtspunkten

### 3.3 Bewertung nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten

### 3.4 Was bedeutet der Atom- und Braunkohleausstieg für die Kraftwerksreserven?

### 3.5 Auswirkungen des Ausbaus der erneuerbaren Energien auf die Kraftwerksreserven

## 4 Zusammenfassung und Ausblick





## 5 Literatur

- Wirth, H. (Sep. 2022). *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland*. Report. Fraunhofer ISE (siehe S. 4).
- Wawer, T. (2022). *Elektrizitätswirtschaft. Eine praxisorientierte Einführung in Strommärkte und Stromhandel*. Wiesbaden: Springer Gabler (siehe S. 5, 6).
- Reitsam, N. (2022). „Potentiale einer solidarischen Eigenstromerzeugung der Industrie zur Bereitstellung von Backup-Leistung auf dem deutschen Strommarkt“. Dissertation. München: Technische Universität München (siehe S. 4).



## **6 Anhang**

### **Anhangsverzeichnis**