



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: 06.01.2023



„Hiermit versichern wir Moritz Deckert und Fynn Linnenbrügger an Eides Statt, dass wir die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen verwendet haben.“

Wolfenbüttel, den 24. Dezember 2022

Deckert, Moritz

Wolfenbüttel, den 24. Dezember 2022

Linnenbrügger, Fynn



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Wie kann der Begriff Kraftwerksreserve definiert werden?	6
2.1	Wie funktioniert der deutsche Strommarkt?	6
2.2	Kraftwerksreserven zur Netzfrequenzstabilisierung	8
2.2.1	Primärregelreserve	10
2.2.2	Sekundärregelreserve	11
2.2.3	Minutenreserve	12
2.2.4	Primärenergieträger und Einsatzzeiten	13
2.2.5	Momentanreserve	15
2.3	Kraftwerksreserven zur Reserveleistungsvorhaltung	16
2.3.1	Netzreserve	16
2.3.2	Kapazitätsreserve	19
2.3.3	Sicherheitsbereitschaft	21
2.4	Veränderungen der Kraftwerksreserven aufgrund des russischen Überfalls auf die Ukraine	22
3	Aktuelle Bewertung der Kraftwerksreserven zur Frequenzstabilisierung und Reserveleistungsvorhaltung	23
3.1	Bewertung der logistischen Situation der Reserven	23
3.1.1	Logistischer Stand der Braunkohle	23
3.1.2	Logistischer Stand der Steinkohle	24
3.1.3	Logistischer Stand des Erdgases	25
3.1.4	Logistischer Stand des Mineralöls	25
3.2	Kapazitätssituation für den Winter 2022/23	26
3.2.1	Der zweite Stresstest für die Stromversorgung	27
3.2.2	Umsetzung der Empfehlungen	27
4	Die zukünftige Entwicklung von Kraftwerksreserven	28
4.1	Aktueller Stand der Stromproduktion und des Energiesystems	29
4.2	Entwicklung eines klimaneutralen Energiesystems bis zum Jahr 2035	30
4.3	Entwicklung eines klimaneutralen Energiesystems bis zum Jahr 2045	33
4.4	Vergleich der Studien im Hinblick auf die Entwicklung der Kraftwerksreserven	35
5	Zusammenfassung und Ausblick	37
6	Literatur	38
7	Anhang	43



Abbildungsverzeichnis

2.1	Strompreisbildung an der Börse nach der Merit-Order [4, S. 68] . . .	6
2.2	Strompreisbildung an der Börse mit dem Merit-Order-Effekt [4, S. 68]	7
2.3	Regelzonen und Übertragungsnetzbetreiber in Deutschland [3, S. 75]	8
2.4	Beispielhafte Darstellung der Regelarbeit in Abhängigkeit der Netz- frequenz [3, S: 98]	9
2.5	Zeitliche Abfolge der Regelleistungsreserven zur Netzfrequenzstabi- lisierung [3, S. 207]	9
2.6	Mitglieder der ENTSO-E für PRL [5]	10
2.7	Eigenschaften der drei Regelleistungsstufen [15, S. 20]	12
2.8	Netz-,Kapazitätsreserven und Sicherheitsbereitschaft in Deutschland [25], Quelle: Eigene Darstellung	16
3.1	Vergleich von Ölreserven verschiedener europäischer Länder [42] . . .	26
4.1	Annahmen im Szenario [52, S.22]	30
4.2	Bruttozubau Erneuerbarer Energien im Szenario KNS2035 [52, S.24]	31
4.3	Bruttostromverbrauch im Szenario KNS2035 [52, S.33]	32
4.4	Energieerzeugung und -verbrauch 2030 und 2045 im Vergleich [54, S.9]	34

Tabellenverzeichnis

2.1	Präqualifizierte Leistung je Primärenergieträger/Kategorie in Deutsch- land, Stand: 01.01.2022 [9]	14
2.2	Einsatzhäufigkeit von positiver und negativer Minutenreserve [21, S. 213 ff.]	15
2.3	Kraftwerke in der Netzreserve [25]	18
2.4	Einsätze der Netzreserve [21, S. 158]	19
2.5	Kraftwerke in der Kapazitätsreserve [25]	20
2.6	Kraftwerke in der Sicherheitsbereitschaft [25]	21



Abkürzungsverzeichnis

ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
VNB	Verteilnetzbetreiber
EOM	Energy-Only-Market
BNetzA	Bundesnetzagentur
PRL	Primärregelreserve
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
SRL	Sekundärregelreserve
NRV	Netzregelverbund
MRL	Minutenreserve
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
KVBG	Kohleverstromungsbeendigungsgesetz
EKBG	Ersatzkraftwerksbereithaltungsgesetz
FSRU	Floating Storage and Regasification Unit
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz



1 Einleitung

Kraftwerksreserven sind im deutschen Stromsektor ein weitgefächelter Bereich, welcher einer Erklärung unter verschiedenen Gesichtspunkten bedarf. Dieser Begriff vereint mehrere Mechanismen zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage am Strommarkt und der zuverlässigen Beständigkeit der Versorgungssicherheit in Deutschland. Ziel der folgenden Projektarbeit im Seminarfach „Regenerative Energietechnik“ ist es die einzelnen Reserven genauer zu beleuchten und anhand unterschiedlicher Einflüsse zu analysieren. Im ersten Teil wird der Begriff der Kraftwerksreserve genauer untersucht, da es unterschiedliche Arten von Reserven gibt, um verschiedene Aufgaben zu bewältigen. Darüber hinaus wird das Funktionsprinzip des Strommarkts dargestellt, um die Unterschiede zu verdeutlichen. Der zweite Teil beschäftigt sich mit der Analyse von Kraftwerksreserven unter gesetzlichen, logistischen sowie wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Im Anschluss wird Bezug auf die Bedeutung des Atom- und Braunkohleausstiegs für die Kraftwerksreserven genommen. Zuletzt werden positive und negative Auswirkungen durch den Ausbau der erneuerbaren Energien auf die Kraftwerksreserven beleuchtet.

Das Thema Versorgungssicherheit rückt nicht zuletzt durch den anhaltenden Ukraine Konflikt in den Fokus der Öffentlichkeit. Die unregelmäßigen Gaslieferungen aus Russland stellen eine Bedrohung für die deutsche Infrastruktur und Wirtschaft dar. Die dadurch verursachte Gasknappheit lässt die Preise für Energie in Deutschland und im Euroraum stark ansteigen. Nach Gesetzesänderungen der Bundesregierung rücken z.B. ältere Kohlekraftwerke aus unterschiedlichen Reserven in den Strommarkt nach, um die Verstromung aus Gas zu reduzieren und den Erdgasmarkt und -preis zu entspannen. Außerdem setzt der Ausbau der erneuerbaren Energien und die damit einhergehende Volatilität der Stromerzeugung, die Stromnetze vor eine enorme Herausforderung. An dieser Stelle werden weitere Kraftwerksreserven benötigt, um das Netz zu entlasten und regionale Unterschiede in der Erzeugung auszugleichen. Des Weiteren benötigt die Sicherung der Netzfrequenz weitere Ressourcen, um einen Zusammenbruch zu verhindern. Für die schnelle Regelbarkeit der Frequenz stehen vier unterschiedliche Arten von Regelleistungsreserven zur Verfügung. Im Anschluss wird nun auf die beschriebenen Thematiken Bezug genommen und auf die daraus resultierenden Herausforderungen für die Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) und Verteilnetzbetreiber (VNB) eingegangen.



2 Wie kann der Begriff Kraftwerksreserve definiert werden?

Im Folgenden werden die Kraftwerksreserven zur Frequenzstabilisierung und zur Reserveleistungsvorhaltung vorgestellt. Dabei wird auf die Funktionsweise und Kosten eingegangen. Des Weiteren wird eine Lokalisierung bzw. Einteilung nach Bereitstellungsunternehmen vorgenommen. Grundlage dafür bildet der Strommarkt, welcher in Kapitel 2.1 behandelt wird. Zuletzt werden die Änderungen innerhalb der Kraftwerksreserven zur Reserveleistungsvorhaltung aufgrund der Folgen des Ukraine-Konflikts erklärt.

2.1 Wie funktioniert der deutsche Strommarkt?

Der deutsche Strommarkt wird als ein Energy-Only-Market (EOM) bezeichnet. Dies bedeutet, dass ausschließlich der tatsächlich produzierte Strom gehandelt wird. Anders ist dies beim Kapazitätsmarkt, indem die vorgehaltenen Leistungen für unter anderem Dunkelflauten oder Leistungsspitzen vergütet werden [2].

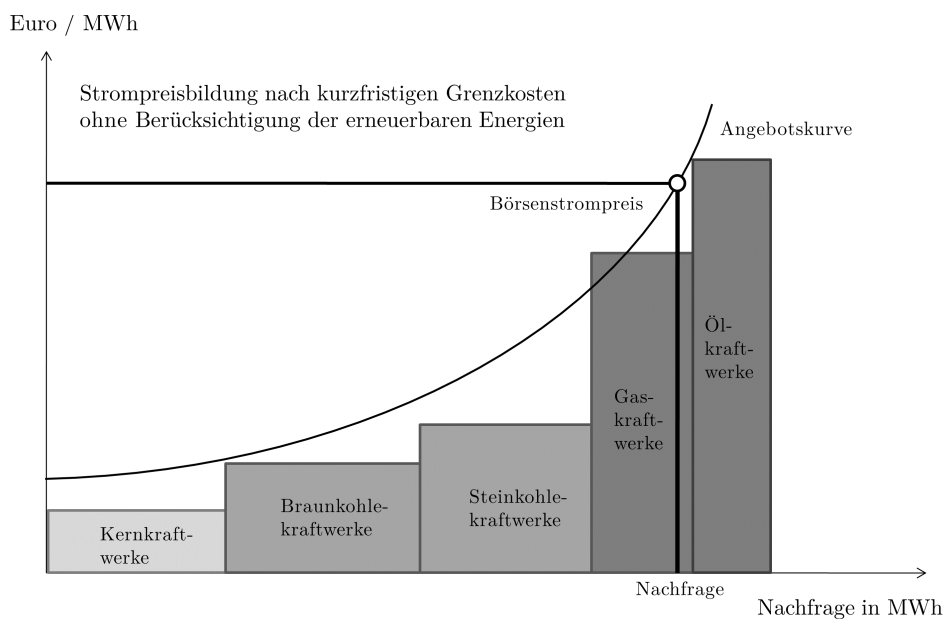


Abb. 2.1: Strompreisbildung an der Börse nach der Merit-Order [4, S. 68]

Die Preisbildung erfolgt nach dem Prinzip der Merit-Order (s. Abb. 2.1). In der Merit-Order werden alle Stromproduzenten, welche zu gegebenem 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. Diese Abfolge wiederholt sich, bis ein Stromproduzent mit seiner angebotenen Strommenge Angebot und Nachfrage ausgleicht. Dieses sogenannte Grenzkostenkraftwerk legt den



zu vergütenden Strompreis für alle anderen Marktteilnehmer in der Merit-Order unter ihm fest. Daraus entstehen für Marktteilnehmer auf vorderen Plätzen mit Grenzkosten nahe null hohe Gewinne. Teilnehmer, welche in der Reihenfolge dem Grenzkostenkraftwerk näher kommen, erzielen immer geringer werdende Gewinne. Als Grenzkosten werden die Erzeugungskosten für die genau auf dem Markt angebotene Strommenge bezeichnet. In Abbildung 2.1 ist die typisch zu erwartende Reihenfolge der Primärenergieträger zur Stromerzeugung dargestellt.

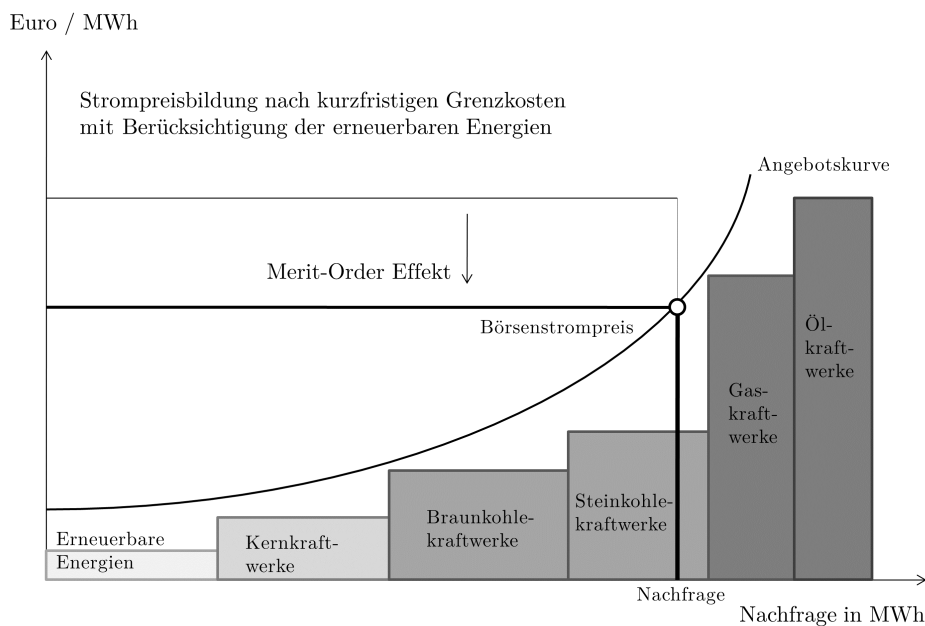


Abb. 2.2: Strompreisbildung an der Börse mit dem Merit-Order-Effekt [4, S. 68]

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-, Öl- sowie Pumpspeicherkraftwerke, in der Reihenfolge nach rechts rücken (Merit-Order-Effekt, s. Abb. 2.1). Das Verdrängen dieser Kraftwerke führt zu einem sinkenden Strompreis an der Böse [1, S. 11 f.]. Auf signifikante Betriebsstunden kommen die genannten Kraftwerke dementsprechend nur bei mangelndem Wind und mangelnder Sonneneinstrahlung. Dies führt bei den Kraftwerksbetreibern zu geringen bzw. unvorhersehbaren Betriebsstunden. Für den Strompreis hingegen bedeutet dies erhebliche Schwankungen je nach gegebener Wetterlage. Ohne ausreichende und planbare Betriebsstunden können die Kraftwerke nicht wirtschaftlich betrieben werden, da die Leistung ohne Vergütung vorgehalten werden muss [1, S. 11 f.]. Gegensätzlich dazu verlangt der Ausbau regenerativer Stromerzeuger einen Zuwachs dieser Kraftwerke, um plötzlich auftretende Schwankungen in der Pro-



duktion auszugleichen [4, S. 66 ff.]. Auch ohne weiteren Ausbau von erneuerbaren Energien wird gerade in den wenig sonnigen Wintermonaten Januar und Februar weiterhin Residuallast gebraucht. Konträr dazu wurde eine strategische Kraftwerksreserve aus Braunkohlekraftwerken aufgebaut (Sicherheitsbereitschaft) [14]. Die Forderung eines Kapazitätsmarkts, indem auch vorgehaltene Kraftwerksleistung bepreist wird, gewinnt dahingehend an Aufmerksamkeit und Bedeutung.

2.2 Kraftwerksreserven zur Netzfrequenzstabilisierung

Aufgrund des liberalisierten Strommarkts besitzen die Übertragungsnetzbetreiber zur Stabilisierung keine eigenen Kraftwerke. Die Kraftwerksreserven zur Netzfrequenzstabilisierung werden deshalb am Regelenenergiemarkt gehandelt. Unter Regelenenergie versteht man zum einen die Reservierung von Kraftwerksreserven bzw. -kapazitäten (Regelleistung) und zum anderen den Ausgleich von Regelzonenungleichgewichten (Regelarbeit) [3, S. 97 ff.]. Da es im Stromnetz zu negativen und positiven Abweichungen der Frequenz kommen kann, wird zur Kompensation sowohl positive als auch negative Regelarbeit benötigt. Anders als bei der Regelleistung wird eine gelieferte Strommenge in MWh vergütet. Um Unterschiede zwischen Angebot und Nachfrage innerhalb und unter den vier deutschen Regelzonen auszugleichen, wird eine Reservierung von Kraftwerksleistung erforderlich (Regelzonen s. Abb. 2.3). In diesem Fall

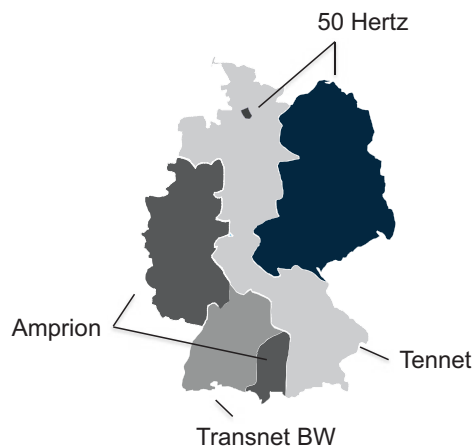


Abb. 2.3: Regelzonen und Übertragungsnetzbetreiber in Deutschland [3, S. 75]

erfolgt eine Bezahlung der Kraftwerke unabhängig von der gelieferten Strommenge und Einsatzzeit [S. 97 ff.] Elektrizitätswirtschaft. Die Bezahlung fungiert als eine Art Entschädigung für das Vorhalten von Kraftwerkskapazitäten, gegebenenfalls nicht Abrufen der Kraftwerksleistung und den damit verbundenen Fixkosten zur Erhaltung der Einsatzbereitschaft.

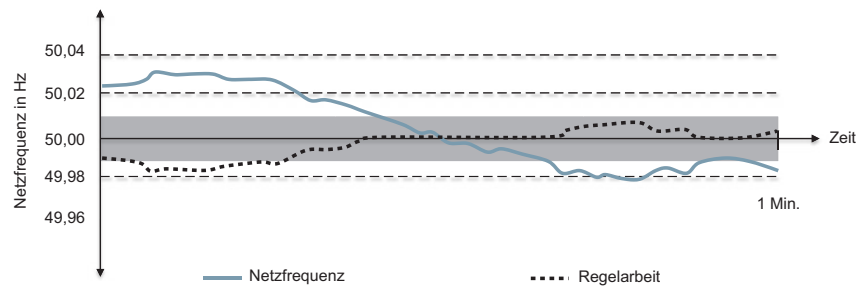


Abb. 2.4: Beispielhafte Darstellung der Regularbeit in Abhängigkeit der Netzfrequenz [3, S: 98]

Um die Frequenz von 50 Hz im deutschen bzw. europäischen Stromnetz stabil zu halten, muss ständig Regularbeit eingesetzt werden. Um diese kontinuierlich abrufen zu können, wird Regelleistung benötigt. Für die Netzfrequenz gibt es eine zulässige Schwankungsbreite von ± 10 mHz [12]. Erst ab einer Unterschreitung von 49,99 Hz bzw. Überschreitung von 50,01 Hz wird die Frequenz durch Einsatz von Regelleistung stabilisiert. Bei einer zu geringen Netzfrequenz ist zu wenig Strom im Netz. Dies kann aufgrund von zu hohem Stromverbrauch oder Ausfällen seitens der Stromerzeuger geschehen. 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 zwischen der Regularbeit und der Netzfrequenz dargestellt. Für die beschriebenen Mechanismen gibt es im Wesentlichen drei Regelleistungen, die Primär-, Sekundärregelenergie und die Minutenreserve. In Abbildung 2.2 sind die Regellenergiearten in ihrer Einsatzreihenfolge und Reaktionsgeschwindigkeit dargestellt.

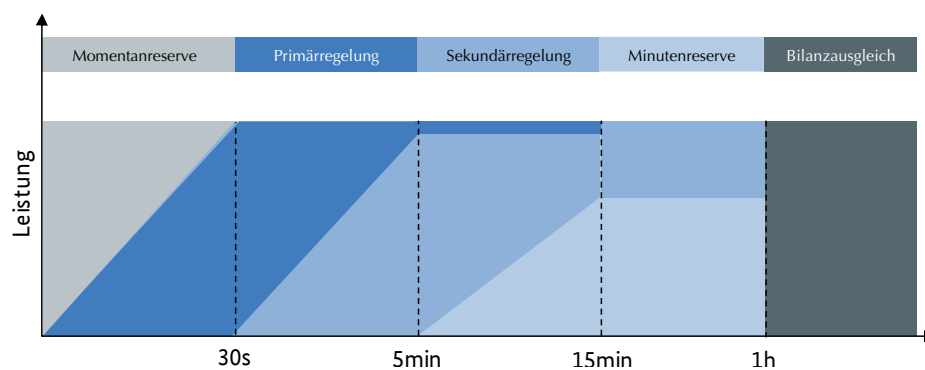


Abb. 2.5: Zeitliche Abfolge der Regelleistungsreserven zur Netzfrequenzstabilisierung [3, S. 207]



2.2.1 Primärregelreserve

Der Eingriff durch die Primärregelreserve (PRL) erfolgt unmittelbar nach Übersowie Unterschreitung des zulässigen Frequenzbereichs durch die Anbieter von Primärreserven. Die Bereitstellung erfolgt über ein Zusammenschluss von Nachbarstaaten aus dem Gebiet der ENTSO-E („European Network of Transmission System Operators for Electricity“). Da es sich bei dem ENTSO-E um ein Synchrongebiet mit 50 Hz Netzfrequenz handelt, wird die Höhe der Vorhaltung von Primärregelleistung unter allen Teilnehmern, gemessen am eingespeisten Strom, aufgeteilt. Die Mitglieder des Zusammenschlusses können der Abbildung 2.6 entnommen werden. Die gesamte Kapazität aller Mitglieder beläuft sich auf ± 3 GW und wird anhand des zeitgleichen Ausfalls der zwei größten Kraftwerksblöcke innerhalb des Verbundnetzes ermittelt. Um

schnell und frequenzabhängig Strom einzuspeisen oder zu speichern, wird am Ort des Anbieters die Netzfrequenz gemessen. Innerhalb von 30 s muss die komplette Regelleistung abrufbar sein. Nach 15 Minuten wird die Primärregelreserve heruntergefahren und die Minutenreserve übernimmt, um neu auftretenden Störungen entgegenzuwirken. Der Regelbereich befindet sich dabei innerhalb des Regelbands und außerhalb des Totbands (s. Abb. 2.2). Ab einer Netzfrequenz von 49,99 Hz bzw. 50,01 Hz

muss der Stromlieferant die Primärregelleistung hochfahren und bei einer Frequenz von 49,8 Hz bzw. 50,2 Hz 100 % seiner angebotenen Leistung abrufen bzw. liefern können [10].

Die Ausschreibung von Primärregelleistung erfolgt täglich für einen Erbringungszeitraum von 0:00 Uhr bis 24:00 Uhr am Folgetag. Angebotsabgabe erfolgt am Vortag bis 8:00 Uhr [9]. Die Auktion erfolgt online über die Internetseite regelleistung.net [9]. Zuschlag bekommen diejenigen Anbieter, welche für den ÜNB am wirtschaftlichsten sind. Der Anbieter, welcher Angebot und Nachfrage deckt, legt den Leistungspreis für alle anderen bezuschlagten Teilnehmer fest („Marginal Pricing“). In Abbildung 2.7 sind die wichtigsten Eckpunkte der Primärregelleistung dargestellt.

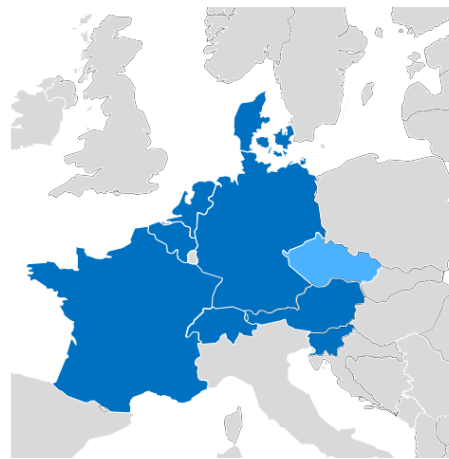


Abb. 2.6: Mitglieder der ENTSO-E für PRL [5]



2.2.2 Sekundärregelreserve

Bei länger anhaltender Frequenzabweichung wird die Sekundärregelreserve (SRL) zugeschaltet, um die Frequenz durch sowohl positive als auch negative Regelleistung zu stabilisieren. Sie wird durch den innerhalb der Regelzone zuständigen Übertragungsnetzbetreiber per Signal angefordert und durch die an der Auktion teilgenommenen Anbieter von SRL abgerufen. Die SRL wird nach 30 Sekunden zugeschaltet und muss nach fünf Minuten volle Regelarbeit liefern können. Diese muss dann anschließend bis maximal eine Stunde nach Beginn des Störfalles geliefert werden. Für den täglichen Abruf der Reserve gibt es sechs Zeitscheiben mit je vier Stunden. Da die Sekundärregelleistungsanbieter ihre Anlagen im Verbund nicht auf einige MW modulieren können, besteht fast kontinuierlicher Bedarf an Sekundärregelleistung. Durch den Netzregelverbund (NRV) wird ineffizientes „Gegeneinanderregeln“ vermieden und die Höhe der vorzuhaltenden Regelleistung reduziert. Dieser wurde nach Aussagen der BNetzA auf weitere Nachbarstaaten ausgeweitet und trägt damit einer weiteren Reduzierung bei [21, S. 207 f.].

Die Mindestangebotsgröße beträgt 5 MW. Jedoch können nach einer Änderung des Beschlusses „zur Festlegung von Ausschreibungsbedingungen und Veröffentlichungspflichten für Sekundärregelung“ der BNetzA auch Angebote in Höhe von 1 MW bis 4 MW eingereicht werden. Diese Änderung ist an die Maßgabe geknüpft, dass die Anbieter ausschließlich ein Angebot je Zeitscheibe für positive oder negative Regelleistung abgeben dürfen [7]. Die Reduzierung erleichtert den Eintritt für kleinere Anbieter oder virtuelle Kraftwerke, welche mehrere Anlagen poolen. Pooling bezeichnet das Zusammenschalten, meist zu virtuellen Kraftwerken, von mehreren kleinen Anlagen zur Stromerzeugung oder -speicherung.

Die Sekundärregelreserven werden täglich ausgeschrieben. Bis zum Vortag um 9:00 Uhr muss das Angebot für den Folgetag abgegeben werden [9]. Vergütet wird aufgeteilt nach dem Leistungs- und Arbeitspreis. Dies bedeutet, dass jeder Anbieter einen Festpreis für die Vorhaltung der angebotenen Leistung abgibt, egal ob diese abgerufen wird (Handel auf dem Regelleistungsmarkt). Der abgegebene Arbeitspreis wird auf dem Regelarbeitsmarkt gehandelt und gibt an, wie hoch die Vergütung je erbrachter MW h ist. Die Vergabe erfolgt nach einer Merit-Order-Liste, in welcher die Bieter nach aufsteigendem Preis aufgelistet werden. Jedoch erfolgt die Vergütung nach dem Pay-as-Bid Verfahren. Dies bedeutet, dass ausschließlich der angebotene Preis bezahlt wird [4, S. 81 ff.]. Die Abbildung 2.7 zeigt nochmals die wichtigsten Eckdaten der Sekundärregelreserve.



2.2.3 Minutenreserve

Die Minutenreserve ist die dritte Maßnahme zur Stabilisierung der Netzfrequenz. Falls die Sekundärregelreserve die Frequenz nicht binnen 15 Minuten stabilisieren kann, muss die Minutenreserve innerhalb von weiteren 15 Minuten auf volle Leistung hochfahrbar sein. Die Mindestangebotsgröße beträgt wie bei der Sekundärregelreserve 5 MW und unter der bereits erläuterten Prämisse können auch Angebote in Höhe von mindestens 1 MW bis 4 MW abgegeben werden. Das Pooling von Anlagenleistung ist ebenfalls möglich, um kleinerer Anbieter den Einstieg zu erleichtern. Geboten wird ebenfalls auf sechs Zeitscheiben, welche sich über jeweils vier Stunden erstrecken [4, S. 81 ff.].

Die Vergütung erfolgt analog zu der Sekundärregelreserve, aufgeteilt nach Leistungs- und Arbeitspreis. Das Einreichen von Angeboten und die darauffolgende Vergabe verläuft ebenfalls analog zu der SRL. Die Angebotsabgabefrist verschiebt sich lediglich um eine Stunde auf 10:00 Uhr [9].

	Primärregelung	Sekundärregelung	Minutenreserve
Art der Reserve- Aktivierung	linear gekoppelt an Netzfrequenz	automatisiert akti- vierbar	manuell aktivierbar
Zweck	Frequenzabweichung abbremsen/stoppen	Soll-Frequenz wie- derherstellen	Ersatz SRL und Re- gelzonenausgleich
Preiskomponenten	Leistungspreis	Arbeits- und Leis- tungspreis	Arbeits- und Leis- tungspreis
Abzudeckendes Zeitintervall	4h-Zeitscheiben (seit 01.07.2020)	4h-Zeitscheiben	4h-Zeitscheiben
Mindestangebots- größe	+/- 1 MW	5 MW*	5 MW*
Ausschreibungs- termine	kalendertäglich D-1 um 8 Uhr	kalendertäglich D-1 um 9 Uhr	kalendertäglich D-1 um 10 Uhr
*) Eine Angebotsgröße von 1 MW, 2 MW, 3 MW oder 4 MW ist unter der Maßgabe zulässig, dass ein Anbieter von Minutenreserve nur ein einziges Angebot je Produktzeitscheibe der positiven bzw. negativen MRL in der jeweiligen Regelzone abgibt.			

Abb. 2.7: Eigenschaften der drei Regelleistungstufen [15, S. 20]



2.2.4 Primärenergieträger und Einsatzzeiten

Aus Tabelle 2.1 können die präqualifizierten Leistungen je Primärenergieträger entnommen werden. Auffällig ist der hohe Anteil an Wasserkraft mit 69,0 %, 64,3 % und 42,3 % an der Primär-, Sekundärreserve bzw. Minutenreserve. Dies ist auf die zügige Regelbarkeit von Wasserkraftwerken zurückzuführen. Hierbei findet jedoch keine Unterteilung in Laufwasser- oder Pumpspeicherkraftwerke statt. Da die Ausschreibung der Reserven täglich stattfindet, finden saisonale Schwankung der Wasserkraft dennoch Berücksichtigung [4, S. 80]. Außerdem kann festgestellt werden, dass die kontrahierte Leistung an Wasserkraft die in Deutschland installierte Leistung übersteigt. Dies ist im Wesentlichen auf zwei Punkte zurückzuführen. Zum einen bieten die Betreiber die Ein- sowie Ausspeicherung von Energie gemeinsam für die positive sowie negative Regelleistung an. Somit taucht die kumulierte Leistung aus Ein- und Ausspeicherung in der Tabelle auf. Zum anderen werden auch grenznahe Kraftwerke für die Bereitstellung von PRL kontrahiert [16, S. 144].

Obwohl Erdgaskraftwerke schnell geregelt und hochgefahren werden können, weisen diese erst ab der Sekundärreserve nennenswerte Anteile auf (SRL: 15,1 % und MRL: 21,1 %). Für die Bereitstellung von Primärregelreserve muss das Kraftwerk bereits am Netz sein, um innerhalb von 30 Sekunden nennenswerte Regelleistung bereitstellen zu können (vgl. Kap. 2.2.1). Wie bereits in Kapitel 2.1 erläutert, liegen die Gaskraftwerke häufig an der Grenze zwischen Teilnahme und Nichtteilnahme am Strommarkt. Wenn diese aufgrund von erhöhter Einspeisung der Erneuerbaren nicht am Strommarkt teilnehmen, können die Erdgaskraftwerke keine Primärregelleistung bereitstellen.

Konventionelle Braun- und Steinkohlekraftwerke haben lediglich an der Minutenreserve einen größeren Anteil mit 21,5 % (Braun- und Steinkohlekraftwerksleistung addiert). Die vorgehaltene Leistung steigt mit der Regelenergieart stetig an. Dies liegt wiederum an der mangelnden Schnelligkeit zur Regelung von Kraftwerksleistung. Des Weiteren ist gut zu erkennen, dass Windkraft, Batteriespeicher und Demand-Side-Management Systeme keine großen Anteile an der Netzfrequenzstabilisierung aufweisen. Bei Batteriespeichern liegt das an den massiven Investitionskosten für große Kapazitäten. Jedoch kommt Batteriespeichern in Zukunft eine größere Rolle zu, da diese schnell viel Leistung speichern sowie abgeben können. Somit kann dem schrittweisen Wegfall der Momentanreserve ein Stück weit entgegengewirkt werden.



Tab. 2.1: Präqualifizierte Leistung je Primärenergieträger/Kategorie in Deutschland, Stand: 01.01.2022 [9]

Technologie [–]	FCR [GW]	aFRR+ [GW]	aFRR– [GW]	mFRR+ [GW]	mFRR– [GW]
Kernenergie	0,22	0,18	0,19	1,27	1,27
Braunkohle	0,56	1,20	1,21	4,16	4,20
Steinkohle	0,48	1,05	1,07	2,98	2,88
Erdgas	0,35	3,53	3,57	7,10	6,94
Öl	-	0,26	0,03	1,28	0,09
Biogas/-masse	0,04	1,82	2,29	2,27	2,75
Wasser	4,79	15,10	15,15	13,99	14,01
Batteriespeicher	0,48	0,08	0,06	-	-
Nachfrage/DSM	0,02	0,12	0,07	0,20	0,14
Windkraft	-	-	0,03	-	0,22
Sonstige	-	0,01	0,01	0,11	0,30
Summe	6,94	23,35	23,68	33,36	32,80

Um die Diversität der Teilnehmer am Regelleistungsmarkt zu analysieren, kann die von den ÜNB veröffentlichte Liste genutzt werden [9]. Auf der Liste sind insgesamt 53 Unternehmen aufgeführt, welche am Regelleistungsmarkt ihre Kapazitäten zur Verfügung stellen. Ausschließlich Unternehmen, welche die Präqualifikationskriterien des in der Regelzone verantwortlichen ÜNB erfüllen, dürfen am Regelleistungsmarkt teilnehmen. Die Mehrzahl der aufgelisteten Marktteilnehmer sind Energieversorgungsunternehmen oder solche, die sich auf Energie- und Systemdienstleistungen spezialisiert haben. Lediglich acht Unternehmen sind aus der Industrie. Nennenswert ist der Ludwigshafener Chemiekonzern BASF oder Trimet Aluminium SE. Die aufgelisteten Industriekonzerne bieten in erster Linie Sekundär- und Minutenreserve an. Die wenigen Industrieunternehmen, die Primärreserven vorhalten, haben sich auf Batteriespeicher spezialisiert und können damit schnelle bzw. dynamische Reserven zur Verfügung stellen. Nach Stand vom 28.01.2022 haben 30 Unternehmen Primärregelleistung und jeweils 34 Sekundärregelleistung bzw. Minutenreserve angeboten.

Aus dem Monitoringbericht der BNetzA geht hervor, dass die Primärregelreserven ständig und unmittelbar abgerufen werden. Es findet also eine ständige Korrektur der Netzfrequenz statt. Ähnlich verhält es sich bei der Sekundärregelleistung. In nahezu jeder der jährlichen 35 040 Viertelstunden kommt die Sekundärregelreserve zum Einsatz. Im Hinblick auf die Minutenreserve kann ein deutlicher Rückgang zum Vorjahr verzeichnet werden (2019: 8313 und 2020: 3230) [21, S. 213 ff.]. Auffallend ist ebenso, dass die positive MRL deutlich häufiger als die negative abge-



rufen wird (s. Tab. 2.2). Dies lag unter anderem am Mischpreisverfahren, dass von Oktober 2018 bis Juli 2019 in Kraft war. Durch vorrangiges Ansteigen der Leistungspreise zur Bereitstellung von Regelleistung sind die Arbeitspreise gesunken, welche nur bei einem Abruf von Regelenergie gezahlt werden. Demnach ergaben sich wenig Anreize für Bilanzkreisverantwortliche, ihre Netzprognosen sorgfältig abzugeben, da die bei Ungleichgewichten gezahlten Arbeitspreise zur aktiven Regulierung der Netzfrequenz sehr gering ausfielen. Somit war es wirtschaftlicher Angebot und Nachfrage über Aktivierung von Regelreserven als durch sorgfältige Verbrauchsprognosen zu regulieren [21, S. 215 f.].

Tab. 2.2: Einsatzhäufigkeit von positiver und negativer Minutenreserve [21, S. 213 ff.]

Einsatzhäufigkeit	2019	2020
MRL positiv	5271	2256
MRL negativ	3042	974

2.2.5 Momentanreserve

Eine weitere Möglichkeit zur Frequenzstabilisierung stellt die Momentanreserve dar. Da die ÜNB keinen direkten Einfluss auf die Momentanreserve haben, ist sie im Sinne der klassischen Regelleistungen wie PRL, SRL und MRL keine Systemdienstleistung. Momentanreserven sind rotierende Schwungmassen aus z.B. Generatoren, welche intrinsisch auf die Netzfrequenz wirken. Die Momentanreserve greift noch vor der Primärregelleistung ein und wirkt dadurch unmittelbar auf das Netz, ohne dass diese gezielt ab- oder zugeschaltet wird. Generatoren, die direkt an das deutsche Stromnetz angeschlossen sind, sind auf eine Netzfrequenz von 50 Hz eingestellt. Bei Frequenzabfall oder -anstieg drehen sich die Schwungmassen der Generatoren langsamer oder schneller und wirken der Frequenzabweichung dämpfend entgegen [18]. Um die Frequenz innerhalb des Regelbands zu halten, nutzen diese die gespeicherte kinetische, magnetische oder elektrische Energie [19]. Bei Ausbau der erneuerbaren Stromerzeuger, allem voran Wind- und Sonnenenergie, sind unmittelbar abrufbare Momentanreserven für die Aufrechterhaltung der Stromversorgung von zentraler Bedeutung. Die dauerhaft vorzuhaltende Momentanreserve bemisst sich an einem maximalen Leistungssprung bzw. Lastabfall von 3 GW [17].

Aufgrund des direkten Zusammenhangs zwischen dem mechanischen Moment und der elektrischen Leistung ändert sich die Rotationsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Netzfrequenz. Die rotierende Schwungmasse wirkt aufgrund ihrer Massenträgheit durch Aus- und Einspeichern von Rotationsenergie einer Änderung der Rotationsgeschwindigkeit entgegen [17].



2.3 Kraftwerksreserven zur Reserveleistungsvorhaltung

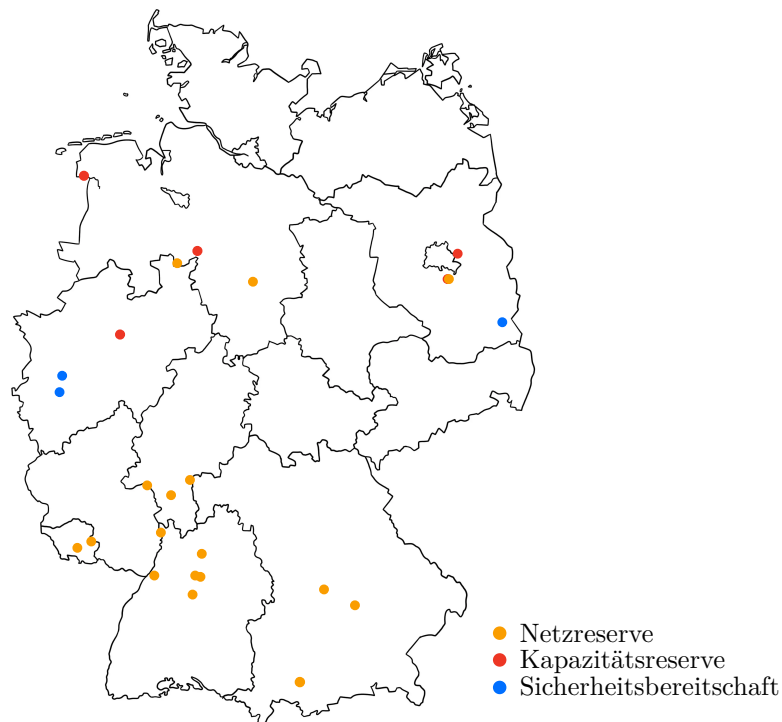


Abb. 2.8: Netz-, Kapazitätsreserven und Sicherheitsbereitschaft in Deutschland [25],
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 2.8 zeigt die deutschlandweite Verteilung von Kraftwerken der Netz-, Kapazitätsreserve sowie den Braunkohlekraftwerken der Sicherheitsbereitschaft. Die drei Arten der Reserveleistungsvorhaltung sind im Energiewirtschaftsgesetz gesetzlich verankert und gegenwärtige Rahmenbedingungen klar definiert. Anhand der Karte wird verdeutlicht, dass die Netzreserve vor allem in Süddeutschland präsent ist (orange Kennzeichnung). Die Gründe für die überaus starke regionale Konzentration im Süden werden in Kapitel 2.3.1 eruiert. Die rot gekennzeichneten Kapazitätsreserven sind hauptsächlich im Norden Deutschlands zu finden. Die drei verbliebenen Braunkohlekraftwerke aus der Sicherheitsbereitschaft sind mit blauen Punkten gekennzeichnet.

2.3.1 Netzreserve

In erster Linie stellt die Netzreserve den ÜNB zusätzliche Kraftwerkskapazitäten für den Redispatch zur Verfügung. Redispatch bezeichnet dabei die Maßnahme,



einen netzseitigen Engpass auszugleichen und zwischenzeitlich auftretende Lastspitzen abzufedern. In den meisten Fällen wird diese Maßnahme mit dem Nord-Süd-Gefälle des Stromnetzes in Verbindung gebracht. Besonders massiv zeigt sich dieses Problem im Winterhalbjahr, da der allgemeine Strombedarf größer ausfällt. Die Windparks im Norden des Landes produzieren viel Strom, welcher unter anderem aufgrund des mangelnden Netzausbaus nicht von Nord nach Süd transportiert werden kann. Um diesen Engpässen entgegenzuwirken und ein Gleichgewicht herzustellen, werden im Norden konventionelle Kraftwerke heruntergefahren und im Süden mit gleicher Leistung hochgefahren (s. Abb. 2.8). So findet ein Ausgleich bzw. eine Entlastung des Stromnetzes über die Grenzen der Regelzonen hinweg statt [23].

Kraftwerke können auf zwei verschiedene Arten in die Netzreserve überführt werden. Zum einen durch die freie Kontrahierung von Anlagen im In- und Ausland. Zum anderen durch Ausweisung von vorläufig oder endgültig stillzulegenden Kraftwerken, welche zuvor von den ÜNB und der BNetzA als systemrelevant eingestuft werden und damit nach dem EnWG nicht still gelegt werden dürfen [22].

Die Höhe der bereitzustellenden Reserve wird anhand von Berechnungen der BNetzA und der jährlichen Systemanalyse der ÜNB ermittelt. Innerhalb der Berechnung werden Erzeugungsspitzen im Norden, Kraftwerksausfälle im Süden und Nichtverfügbarkeiten von Netzbetriebsmitteln gegenüber gestellt. Anschließend erfolgt die Ermittlung, welche Leistung im Süden unterhalb des 50,4 Breitengrades zugeschaltet werden muss, um Angebot und Nachfrage gesamtheitlich auszubalancieren. Für den Winter 2022/2023 ergibt sich daraus eine Reserveleistung von 8,264 GW [24]. Für den Betrachtungszeitraum 2023/2024 bestätigt die BNetzA die Reserveleistung in Höhe von 5,361 GW, welche durch die Systemanalyse der ÜNB ermittelt wurde [24]. Die geplante Verringerung der Leistung ist an den fortlaufenden Netzausbau geknüpft und kann nur bei Einhaltung der Ausbauziele eingehalten werden. In Tabelle 2.3 sind nach Stand des 31.05.2022 alle Kraftwerke der Netzreserve aufgeführt. Da lediglich 7,48 GW von deutschen Kraftwerken bereitgestellt werden können, müssen zusätzliche ausländische Kraftwerkskapazitäten hinzugekauft werden.



Tab. 2.3: Kraftwerke in der Netzreserve [25]

Kraftwerk [–]	Ort [–]	Energieträger [–]	Nettleistung [MW]
Heizkraftwerk Altbach	Altbach	Steinkohle	433
Bexbach	Bexbach	Steinkohle	726
GT 11 & GT 12	Darmstadt	Erdgas	93
Staudinger 4	Großkrotzenburg	Erdgas	622
Ingolstadt 3 und 4	Großmehring	Heizöl	772
HLB 5 und 6	Heilbronn	Steinkohle	250
KWM Block 3	Hohenhameln	Steinkohle	690
RDK 4S DT & GT	Karlsruhe	Erdgas	353
KW2 DT27	Mainz	Erdgas	250
GKM Block 7	Mannheim	Steinkohle	425
Kraftwerk Marbach	Marbach	Heizöl	425
Heyden 4	Petershagen	Steinkohle	875
Weiher 3	Quierscheid	Steinkohle	656
UPM Schongau DKW T4 & T5	Schongau	Erdgas	64
Irsching 3	Vohburg	Heizöl	415
Walheim Block 1 & 2	Walheim	Steinkohle	244
Kraftwerk Thyrow	Zossen	Erdgas	187
Summe			7 480

Die Vergütung erfolgt anhand der Kosten für die dauerhafte Herstellung der Betriebsbereitschaft (Betriebsbereitschaftskosten) und anhand eines Leistungs- und/oder Arbeitspreises, falls diese vorher mit dem zuständigen ÜNB ausgemacht worden sind [22]. Die Ausweisung durch die BNetzA und ÜNB ist für 24 Monate bindend und kann bei erneuter Ausweisung um weitere 24 Monate verlängert werden. Des Weiteren dürfen die Anlagen der Netzreserve auch an den Ausschreibungen der Kapazitätsreserve teilnehmen. Bei erfolgreicher Ausschreibung erfolgt die Vergütung ausschließlich anhand der Kapazitätsreserve. Auf Anordnung der ÜNB müssen die Kraftwerksbetreiber jedoch ihre angegebene Leistung innerhalb der Netzreserve an den aktuellen Bedarf anpassen.



Tab. 2.4: Einsätze der Netzreserve [21, S. 158]

	Tage [d]	Einsatzdurchschnitt [MW]	Maximale Leistungsanforderung [MW]	Summe [MW h]
Januar	9	148	622	12 832
Februar	14	228	1 145	41 638
März	8	121	342	10 147
April	14	183	872	31 022
Mai	22	232	930	85 851
Juni	24	246	560	95 267
Juli	20	208	912	58 588
August	19	226	745	71 112
September	21	297	990	71 576
Oktober	10	156	385	18 324
November	17	322	1 049	95 149
Dezember	13	231	740	43 569
Gesamt	191			635 074

Aus dem Monitoringbericht der BNetzA geht hervor, dass in 2020 an 191 Tagen insgesamt ca. 635 GW h Strom aus Kraftwerken der Netzreserve erzeugt wurden [21, S. 157 f.]. In den Monaten Februar und November sind dabei die größten Leistungen angefallen. Dies ist mit dem bereits angesprochenen Nord-Süd-Gefälle zu begründen. Weiterhin finden in Sommermonaten erhebliche Kraftwerkseinsätze statt. Hierbei rückt nicht die maximal angeforderte Leistung in den Vordergrund sondern die erzeugte Menge Strom. In den Sommermonaten liegt dies unter anderem an der hohen PV-Einspeisung und dem damit erforderlichen regelzonenübergreifenden Bilanzausgleich.

2.3.2 Kapazitätsreserve

Die Kapazitätsreserve stellt den ÜNB eine zusätzliche Möglichkeit zur Verfügung, weitere Leistungsreserven zu aktivieren. Dies geschieht, wenn trotz freier Preisbildung an der Strombörse keine Deckung von Angebot und Nachfrage erzielt wird. Der Abruf der Kapazitätsreserve geschieht zeitlich nach der Strombörse und den Systemdienstleistungen (Regelleistungen) zur Frequenzstabilisierung. Laut dem BMWK werden die Kraftwerke gemäß der Anfahrtszeit bereits am Vortag aktiviert, sobald am Day-Ahead-Market kein markträumendes Ergebnis abzusehen ist [23]. Die Anlagen in der Kapazitätsreserve sollen, sofern sie in netztechnisch geeigneten Regionen liegen, ebenfalls an der Netzreserve teilnehmen (vgl. Gaskraft-



werk Thyrow). Ab dem Winterhalbjahr 2020/2021 waren Kraftwerkskapazitäten mit einer Leistung von 2 GW ausgeschrieben. Nach Stand vom 31.05.2022 wurden Kraftwerke mit einer kumulierten Leistung von 1,263 GW kontrahiert (s. Tab. 2.5). Die daraus resultierende Unterdeckung muss im Ernstfall durch zusätzliche ausländische Kraftwerke kompensiert werden.

Tab. 2.5: Kraftwerke in der Kapazitätsreserve [25]

Kraftwerk [–]	Ort [–]	Energieträger [–]	Nettoleistung [MW]
Gasturbinenkraftwerk Ahrensfelde	Ahrensfelde	Erdgas	148
Gaskraftwerk Emden	Emden	Erdgas	52
Gaskraftwerk Landesbergen	Landesbergen	Erdgas	56
Gersteinwerk F & G	Werne	Erdgas	820
Kraftwerk Thyrow	Zossen	Erdgas	187
Summe			1 263 ¹

¹ Laut Netztransparenz.de wurden 1 086 MW kontrahiert. Der Unterschied zu der Angabe der BNetzA besteht in unterschiedlichen Aussagen zur Nettokraftwerksleistung und Nichtberücksichtigung der Dampfturbinen im Gersteinkraftwerk E & F. Diese sind jedoch in der Excel-Liste der BNetzA als Kapazitätsreserve ausgewiesen [25].

Die Vergabe der Kapazitätsreserve erfolgt durch wettbewerbliche Ausschreibungsverfahren. Die Anlagen können mehrmals an der Ausschreibung teilnehmen und werden anschließend jährlich vergütet. Die dabei entstehenden Kosten werden auf die Netzentgelte umgeschlagen. Folgende Kosten werden dabei berücksichtigt:

- Kosten zur Vorhaltung der Anlage
- Kosten für Anfahrvorgänge innerhalb anderer gesetzlicher Vorschriften
- Kosten zur Instandhaltung
- Kosten für Nachbesserungen
- Kosten für den Eigenstromverbrauch der Anlage
- Kosten für den Werteverbrauch

Gesondert werden außerdem folgende Kosten vergütet:

- Kosten aus Einspeisungen, die innerhalb der Kapazitätsreserve oder Netzreserve angefordert wurden
- variable Instandhaltungskosten für Einspeisungen innerhalb der Netzreserve



- Kosten für die Sicherstellung der Brennstoffversorgung
- Kosten, die durch weitere Anforderungen der ÜNB entstehen (um die Schwarzstartfähigkeit oder Blindleistungseinspeisung ohne Wirkleistungseinspeisung herstellen zu können)

Für die Ausschreibung vom 1. Oktober 2022 bis zum 30. September 2024 wird dabei ein Preis je Megawatt von 62 940 € aufgerufen.

2.3.3 Sicherheitsbereitschaft

Falls Netz- und Kapazitätsreserve nicht ausreichen, um Angebot und Nachfrage am Strommarkt zu decken, sieht das EnWG die Vorhaltung von Kraftwerksleistung innerhalb der Sicherheitsbereitschaft vor. Die Sicherheitsbereitschaft impliziert ausschließlich Braunkohlekraftwerke, welche aufgrund des Kohleausstiegs vorläufig stillgelegt werden sollen. Grund ist, dass Braunkohlekraftwerke für 50 % der CO₂-Emissionen im Stromsektor verantwortlich sind, dabei jedoch nur 24 % der Erzeugung abdecken [27, S. 11 u. S. 31 f.]. Für die in Tabelle 2.6 aufgelisteten Kraftwerke wurden im Vorhinein Stilllegungstermine vereinbart. Nach §13g EnWG dürfen diese jedoch nicht vorläufig stillgelegt werden und stehen den ÜNB für weitere vier Jahre ab dem Stilllegungstermin zur Verfügung. Die Kraftwerke Buschhaus und Frimmersdorf sind nach der Sicherheitsbereitschaft endgültig stillgelegt worden [22].

Tab. 2.6: Kraftwerke in der Sicherheitsbereitschaft [25]

Kraftwerk [–]	Ort [–]	Energieträger [–]	Nettoleistung [MW]
Niederaußem E & F	Bergheim	Braunkohle	594
Neurath C	Grevenbroich	Braunkohle	292
Kraftwerk Jänschwalde Block E & F	Jänschwalde	Braunkohle	1 000
Summe			1 886

Die Anlagen der Sicherheitsbereitschaft müssen innerhalb von zehn Tagen betriebsbereit sein. Nach erfolgreicher Betriebsbereitstellung muss nach elf Stunden Mindestleistung und weiteren 13 Stunden Volllast zur Verfügung stehen. Der Nachweis zur Einhaltung des gesetzlichen Zeitplans erbringen die Betreiber selbst. Eine unabhängige Prüfung seitens der BNetzA oder ähnlichen Institutionen erfolgt nicht. Für die Vorhaltung der Kraftwerksleistung werden insgesamt 1,61 Milliarden Euro bereitgestellt und auf die Netzentgelte umgelegt [23]. Falls die Betreiber nicht rechtzeitig die versprochene Leistung bereitzustellen, sinkt die Vergütung. Nach 13 Tagen findet keine Vergütung mehr statt [22].



Die Linkspartei und Grünen haben zudem öffentlich Kritik an der Notwendigkeit und Einsatzbereitschaft der „Braunkohlereserve“ geäußert. Zum einen wurde die fehlende unabhängige Beurteilung bzgl. des Zeitplans zur Betriebsbereitschaft bemängelt. Zum anderen wurde die Transportlogistik zur Brennstoffbeschaffung sowie die unregelmäßige Personalverfügbarkeit kritisiert. Außerdem wurde angemerkt, dass vor Einsatz der Sicherheitsbereitschaft mehrere Mechanismen greifen, um zusätzliche Kraftwerksleistung zur Verfügung zu stellen. Eine weitere Reserve sei daraufhin nicht unbedingt notwendig [23].

2.4 Veränderungen der Kraftwerksreserven aufgrund des russischen Überfalls auf die Ukraine

Aufgrund des Überfalls Russlands auf die Ukraine und den damit verminderten Gaslieferungen aus Russland soll der Anteil von Erdgas an der Stromproduktion reduziert werden. Hierfür sind zwei Verordnungen, basierend auf den Verordnungsermächtigungen im Energiewirtschaftsgesetz, die durch das Ersatzkraftwerkereithaltungsgesetz beschlossen wurden, in Kraft getreten. Innerhalb dieser ist die reguläre Teilnahme am Strommarkt für die Braunkohlekraftwerke aus der Sicherheitsbereitschaft und Steinkohlekraftwerke aus der Netzreserve geregelt. Dafür gehen die Kraftwerke der Sicherheitsbereitschaft ab dem 01. Oktober in die neu geschaffene Versorgungsreserve über. Diese erlaubt eine reguläre Teilnahme am Strommarkt bis zum 30. Juni 2023. Die Rückkehr in den Strommarkt aus der Netzreserve gilt bis zum 31. März 2024. Bedingung für Inkrafttreten beider Verordnungen ist, dass die Alarmstufe Gas oder Notfallstufe Gas ausgerufen ist. Die Betriebserlaubnis erlischt bei Aufhebung der Alarmstufe oder Notfallstufe Gas am Ende des darauffolgenden Quartals. Somit soll der Weiterbetrieb planbarer und wirtschaftlich attraktiver gestaltet werden. Dies wird in den Kapiteln zur aktuellen Bewertung der Kraftwerksreserven weitergehend ausgeführt.



3 Aktuelle Bewertung der Kraftwerksreserven zur Frequenzstabilisierung und Reserveleistungsvorhaltung

Im vorherigen Kapitel wurden die verschiedenen Reserven in Deutschland beleuchtet und definiert. Außerdem fand eine erste Bewertung der aktuellen Situation statt. Im Folgenden sollen nun die technische und logistische Realisierbarkeit bzw. Nutzbarkeit der verschiedenen Reserven aufgezeigt werden. Außerdem soll ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen, Möglichkeiten und Gefahren gegeben werden. Dabei spielt auch der russische Überfall auf die Ukraine ausschlaggebende eine Rolle. Dieser wird in einer Aufnahme der momentanen deutschen Strategie zur Versorgungssicherheit im Winter berücksichtigt.

3.1 Bewertung der logistischen Situation der Reserven

Die Erhebung der Daten im Punkt Logistik gestaltet sich als herausfordernd, da die logistische Situation von unabhängiger Stelle nicht überwacht wird. Es können sich lediglich Aussagen von den Kraftwerksbetreibern selbst eingeholt werden.

3.1.1 Logistischer Stand der Braunkohle

In der Sicherheitsbereitschaft befinden sich in Deutschland ausschließlich Braunkohlkraftwerke, welche durch zwei Energieversorgungsunternehmen betrieben werden. Zum einen die RWE Power AG mit den zwei Blöcken Niederaußem E und F in Bergheim und dem Block Neurath C in Grevenbroich (Rheinischen Braunkohlerevier). Zum anderen die Lausitzer Energie und Kraftwerke AG, im Folgenden LEAG, mit den zwei Blöcken Jänschwalde E und F in Teichland (Lausitzer Braunkohlerevier) [25].

Die Blöcke des Kraftwerks Jänschwalde werden durch Tagebaue der LEAG in Jänschwalde, Welzow-Süd, Nochten und Reichwalde versorgt. Der Transport wird auf der Schiene durch einen firmeneigenen Eisenbahnbetrieb realisiert. Der Abbau des Tagebaus Jänschwalde stoppt voraussichtlich im Jahr 2023, da dieser dann erschöpft ist. Die Versorgung wird anschließend von den übrigen drei Abbaustandorten übernommen. Das Kraftwerk Jänschwalde stellt mit sechs Kraftwerksblöcken ein Großkraftwerk dar. Da die Kraftwerksblöcke aus der Sicherheitsbereitschaft wieder aktiv am Strommarkt teilnehmen, lässt sich Personalproblem ausschließen [31].

Die in Sicherheitsbereitschaft befindlichen Blöcke Niederaußem E und F sowie Neurath C werden ebenfalls durch RWE-eigene Tagebaue versorgt. Hierbei handelt es sich um die Förderstätten Garzweiler, Hambach und Inden. Der Transport erfolgt über eine Eisenbahngesellschaft der RWE. Auch bei diesen drei Blöcken



handelt es sich um Teile von größeren Kraftwerkskomplexen. Auch die Kraftwerksblöcke der RWE Power AG nehmen wieder aktiv am Strommarkt teil, wodurch sich die Personalsituation als unkritisch erweist [32].

3.1.2 Logistischer Stand der Steinkohle

Die deutschen Steinkohlekraftwerke, welche nicht mehr aktiv am Markt teilnehmen und noch nicht endgültig stillgelegt sind, befinden sich in der Netzreserve. Diese ist im KVGB und § 13b des EnWG rechtlich geregelt. Bei den Betreibern handelt es sich um die EnBW Energie Baden-Württemberg AG, STEAG, Uniper Kraftwerke GmbH, Kraftwerk Mehrum GmbH und das Großkraftwerk Mannheim [25].

Die logistische Situation ist weiterhin angespannt. Niedrige Pegelstände von Rhein und Neckar sowie der fehlende Gleisusbau in Deutschland erschwerten den Steinkohletransport erheblich. Die RAG Deutsche Steinkohle AG war der alleinige Betreiber deutscher Steinkohlebergwerke. Diese stellte den Abbau 2018 komplett ein, da dieser nicht mehr wirtschaftlich war. Dadurch sind die Betreiber zu 100 % auf Importe angewiesen [33].

Die EnBW verstärkt seit Juli 2022 ihre Bemühungen zur Beschaffung und Erschließung von Flächen zur zusätzlichen Lagerung von Steinkohle. Die Personalsituation ist ebenfalls angespannt, da diese langfristig mit der Prämisse der Stilllegung geplant war. Die fünf Blöcke der Netzreserve werden jedoch aller Voraussicht nach nicht wieder am Markt teilnehmen, da diese nach Aussage der EnBW aus technischen Gründen nicht ununterbrochen zur Stromerzeugung eingesetzt werden können. Grund hierfür ist das fortgeschrittene Alter der Anlagen [34].

Der Stromerzeuger STEAG betreibt zwei Kraftwerke in der Netzreserve (Boxberg und Weiher 3 im Saarland). Die herausfordernde Lage der Kohleversorgung, auch mit Hinblick auf den kommenden Winter, veranlasste das Wirtschaftsministerium des Saarlandes zu einem Logistik-Gipfel. Zu den Teilnehmenden gehörten unter anderem der Staatssekretär des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr, die STEAG selbst und die DB Cargo. Die Gespräche ergaben eine vorrangige Behandlung von Kohletransporten auf der Schiene gegenüber dem öffentlichen Personennahverkehr, im Falle von Versorgungsengpässen [36]. Dies stellt die Belieferung der Kraftwerke mit Brennstoff sicher. Zusätzlich tritt das Kraftwerk Boxberg zum 28.10.2022 wieder in den Markt ein. Das Schwesterkraftwerk Weiher 3 folgt am 31.10.2022. Ermöglicht wird dies durch das EKBG welches eine Rückkehr in den Strommarkt bis Frühjahr 2024 gestattet [35].



3.1.3 Logistischer Stand des Erdgases

Infolge des russischen Überfalls auf die Ukraine sanken die deutschen Erdgasimporte aus Russland im September nach Stand vom 03.11.2022 auf null. Zum 03.05.2022 startete die Bundesnetzagentur eine Datenerhebung, um den deutschen Gasverbrauch zu ermitteln [57]. In einer Pressemitteilung vom 29.09.2022 wurde von einer notwendigen Einsparung in Höhe von 20 % gesprochen, um die Versorgungssicherheit im Winter zu gewährleisten. Das Impulspapier von Acatech spricht sogar von 20 bis 30 % [37].

Deutsche Erdgaskraftwerke, welche nicht mehr im Betrieb sind, befinden sich sowohl in der Netz- als auch in der Kapazitätsreserve. Die Versorgung ist sehr stark von den Netzbetreibern abhängig und die Situation nur sehr schwer vorhersehbar. Deutschlands Gasspeicher sind nach Stand vom 13.11.2022 zu knapp 100 % gefüllt [59]. Des Weiteren sollen zum Jahreswechsel 22/23 zwei FSRU's in Betrieb genommen werden [38]. Ein zusätzliches Problem bei der Versorgung stellt die Ausrichtung der in Europa vorhandenen Gas-Infrastruktur dar. Diese ist auf einen Gastransport von Ost nach West ausgerichtet. Der Großteil der europäischen LNG-Terminals befindet sich in Westeuropa. Damit ist eine Umkehrung des Gasflusses notwendig. Dieser sogenannte Reverse-Flow wird ermöglicht, indem die Verdichterstationen umgebaut werden. Danach ist ein Gastransport in beide Richtungen bei voller Kapazität möglich [39].

Ein eventuelles Verbot der Verstromung von Gas ist im Notfallplan Gas beschrieben. Dieser ist in drei Teile unterteilt. Die Frühwarnstufe und die Alarmstufe lassen einen Eingriff des Gesetzgebers vorerst nicht zu. Stattdessen wird auf marktbasierende Maßnahmen zur Regulierung der verbrauchten Gasmengen gesetzt. Sollte die Notfallstufe Gas ausgerufen werden, wird das Bundesministerium für Wirtschaft und Klima in Zusammenarbeit mit der Bundesnetzagentur als Lastverteiler eingesetzt. Zudem kann die Substitution von Erdgas durch andere Brennstoffe angeordnet werden. Dieses ist jedoch nur eine von verschiedenen möglichen Maßnahmen, die ergriffen werden können. Da sich Deutschland noch nie in einer derartigen Situation befunden hat, ist nur schwer vorherzusehen, von welchen Steuermechanismen Gebrauch gemacht wird [40].

3.1.4 Logistischer Stand des Mineralöls

Durch politisch motivierte Verknappung der Öllieferungen wurde der Preis künstlich angehoben, bis es schließlich 1973 zur ersten Ölnappheit in der Geschichte der Bundesrepublik Deutschland kam. Daraufhin wurde 1974 die Internationale Energieagentur gegründet, welche eine zuverlässige Energieversorgung koordinieren soll. Diese empfahl die Einrichtung einer strategischen Ölreserve zur Absicherung gegen eventuell auftretende Lieferausfälle. Seitdem lagert Deutschland genug Öl, um den



Gebäude-, Industrie-, Verkehrs- und Energiesektor für 90 Tage mit Öl zu versorgen [41].

In Deutschland gibt es sechs Blöcke in drei Kraftwerken, die sich in der Netzreserve befinden und mit Öl befeuert werden [25]. Die Versorgung erfolgt über Pipelines und Öltanker. Die Kraftwerke Ingolstadt in Großmehring und Irsching werden durch die TAL-Pipeline, welche von Triest kommend den Großteil Süddeutschlands mit Mineralöl versorgt. Das Kraftwerk Marbach, betrieben durch die EnBW, liegt ebenfalls im Süden Deutschlands und wird durch die Pipeline TAL versorgt. Bei Lieferausfällen besteht in beiden Fällen die Möglichkeit, über die nahe gelegene Donau bzw. den Neckar versorgt zu werden, sofern diese genug Wasser führen und Schiffsverkehr zulassen. Sollte auch dieser Versorgungsweg ausfallen, so steht noch die strategische Ölreserve zur Verfügung. Diese garantiert eine Versorgung mit Mineralöl über mindestens 90 Tage und fällt in Realität sogar größer aus (s. Abbildung 3.1).

Oil stocks in selected countries (mb) and days of forward demand				
Country	Total	Public	Industry	Days
Czech Republic	22	15	7	123
Finland	36	19	17	200
Germany	267	171	98	117
Hungary	27	11	16	163
Lithuania	8	2	7	150
Poland	81	22	59	128
Slovakia	12	6	6	151

Source: IEA
 Days of forward demand are based on average OECD demand over the next three months.

Abb. 3.1: Vergleich von Ölreserven verschiedener europäischer Länder [42]

3.2 Kapazitätssituation für den Winter 2022/23

Im ersten Halbjahr 2022 erzeugte Erdgas 30,7 TW h elektrischen Strom in Deutschland. Dies entspricht einem Anteil von 11,7 % an der Gesamterzeugung [56]. Im Hinblick auf drohende Versorgungsengpässe werden die bis dato getroffenen Gegenmaßnahmen beleuchtet.



3.2.1 Der zweite Stresstest für die Stromversorgung

Im Rahmen des vom BMWK in Auftrag gegebenen Stresstests sollen die Übertragungsnetzbetreiber verschiedene Szenarien für die Versorgungssicherheit im Winter 2022/23 analysieren. Dabei wurde die Gasversorgung, Steinkohleverorgung und eventuell ausfallende Kapazitäten im Ausland in Augenschein genommen. Ein zentraler Punkt der Analyse ist die Annahme, dass Polen keinen Strom exportieren kann, da die Versorgung mit Steinkohle durch Lieferengpässe nicht möglich ist. Des Weiteren wurde davon ausgegangen, dass Frankreich bis zum Winter nicht alle Kernkraftwerke an den Markt bringen kann. Diese sind auf Grund von zu hohen Temperaturen, Niedrigwasser, Wartungsarbeiten und Defekten im Sommer teilweise abgeschaltet worden [58]. Außerdem geht die Studie im kritischsten der drei Szenarien davon aus, dass Süddeutschland und Österreich die vertraglich geregelte Redispatchleistung aus Gaskraftwerken nicht liefern können.

Die Analyse zeigt, dass in den beiden kritischsten Situationen in Deutschland einige Stunden der Lastunterdeckung auftreten können. Des Weiteren wird gezeigt, dass die deutsche Redispatch-Leistung in keinem der drei Szenarien ausreicht. Die Differenz muss über ausländische Kraftwerke ausgeglichen werden. Der Streckbetrieb der deutschen Kernkraftwerke entspannt die Situation dahingehend, dass Lastunterdeckungen weitestgehend vermieden werden können und der Bedarf an Redispatch ebenfalls sinkt [43].

Die Empfehlungen der Übertragungsnetzbetreiber lassen sich zu fünf Säulen zusammenfassen, welche die angespannte Versorgungssituation entspannen sollen.

- Transportkapazitäten erhöhen
- Redispatch-Potential im Ausland fokussieren
- vertragliches Lastmanagement
- Reserven nutzbar machen
- Nutzung weiterer Kraftwerkskapazitäten absichern

3.2.2 Umsetzung der Empfehlungen

Am 07.10.2022 wurde vom Bundesrat die Novelle zum Energiesicherheitsgesetz 3.0 verabschiedet. Dieses baut auf verschiedene Säulen zur Anhebung der Kapazitäten für die Stromerzeugung [44].

- Erhöhung der Stromproduktion aus Photovoltaikanlagen
- Anreize für die Verstromung von Biogas



- Erhöhung der Produktion von Windstrom
- Maßnahmen zur Beschleunigung des Netzausbaus
- Maßnahmen im LNG-Beschleunigungsgesetz
- Erleichterung für den Brennstoffwechsel
- Änderungen im Baugesetzbuch

Zur Erhöhung der Produktionskapazitäten wurde außerdem ein Streckbetrieb für 3 verbleibende deutsche Atomkraftwerke beschlossen. Die Meiler Isar 2, Neckar-Westheim 2 und Emsland werden bis maximal Mitte April 2023 am Netz bleiben. Diese sollen die Gaskraftwerke zusätzlich entlasten und Netzengpässe abfedern [45]. Wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben, wurden die Versorgungsengpässe bei der Steinkohle überwunden. Zudem sind einzelne Reservekraftwerke ab Oktober wieder in den Markt eingetreten. Insgesamt nehmen Steinkohlekraftwerke mit einer Nettoleistung von insgesamt 2,25 GW wieder am Strommarkt teil. Auch die Braunkohlekraftwerke aus der Sicherheitsbereitschaft (siehe 3.1.1) nehmen inzwischen wieder aktiv am Markt teil. Die Blöcke Niederaußem E, F und Neurath C zum 01.10.2022, Jänschwalde E zum 06.10.2022 und Jänschwalde F zum 15.10.2022. Diese summieren sich zu einer Nettoleistung von 1,886 GW auf [46].

4 Die zukünftige Entwicklung von Kraftwerksreserven

Der menschengemachte Klimawandel stellt eine gigantische Bedrohung für das Leben auf der Erde dar. Die Energiewende und mit ihr die essenzielle Veränderung des Strom-, Wärme und Verkehrssektors stellen Deutschland vor drastische Herausforderungen. Zur Erreichung des 1,5-Grad-Ziels müssen die Emissionen weltweit bilanziell auf null reduziert werden. Ohne Reduzierung der CO₂-Emissionen (in Deutschland) ist das CO₂-Budget zur Einhaltung des 1,5 Grad Ziels in 6 Jahren und 8 Monaten erschöpft (Stand November 2022). **!!!Frage weltweit oder Deutschland??!!!**. Das CO₂-Budget für das 2-Grad-Ziel hingegen in 24 Jahren und 5 Monaten. Diese Zeiträume zeigen die Notwendig- sowie Dringlichkeit des Handelns [47].

Dem Stromsektor kommt dabei eine gesonderte Bedeutung zu. Nicht nur bietet dieser den Grundstein für die Dekarbonisierung der übrigen Sektoren, sondern stellt auch heute den größten CO₂-Emittenten dar [48]. Deshalb ist es wichtig, fossile Energieträger sukzessive zu substituieren. Mit der Verankerung des Klimaschutzes zur Generationen- und Freiheitssicherung im Grundgesetz sind die jetzige, aber auch künftige Regierungen verpflichtet, die CO₂-Emissionen zu senken und schlussendlich klimaneutral zu werden. Dafür stellte die Ampel-Koalition im November 2021 ihren Koalitionsvertrag vor, der folgende Maßnahmen enthält[49]:



- Atomausstieg bis Ende 2022
- Kohleausstieg im Optimalfall bis 2030
- Errichtung moderner H₂-ready Gaskraftwerke
- Zulassung von 15 Millionen vollelektrischen PKW bis 2030
- Deckung von 80 % des Bruttostrombedarfs aus erneuerbaren Energien bis 2030
- PV-Ausbau verpflichtend bei gewerblichen Neubauten
- PV-Ausbau auf 200 GW
- Ausweisung von 2 % der Landesfläche für Windkraft
- Kapazitätserhöhung von Offshore-Windkraft auf mindestens 30 GW bis 2030, 40 GW bis 2035 und 70 GW bis 2045
- Elektrolysekapazität von 10 GW bis 2030

Bereits im Oktober 2022 verständigte sich die Regierung mit der RWE Generation SE und dem Wirtschaftsministerium Nordrhein-Westfalen auf einen vorzeitigen Braunkohleausstieg im Rheinischen Revier für 2030 [50].

In den folgenden Abschnitten werden mithilfe von zwei Studien mögliche Energieversorgungsstrukturen für die Jahre 2030 und 2045 aufgezeigt. Anhand dieser wird die zukünftige Entwicklung der Kraftwerksreserven analysiert. Für das Szenario 2030 wird die Studie „Klimaneutrales Stromsystem 2035“ der Agora Energiewende genutzt. Für das Jahr 2045 wird die Studie „Energiewende im Sozialen Raum“, welche auf Annahmen des „Ariadne Report“ des PIK fußt und aus einer Zusammenarbeit von Germanwatch, Global Climate Forum und dem Fraunhofer Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik stammt, genutzt.

4.1 Aktueller Stand der Stromproduktion und des Energiesystems

Im Rahmen der wirtschaftlichen Teilerholung im Jahr 2021 stiegen die CO₂-Emissionen um 33 Millionen Tonnen im Vergleich zum Vorjahr an. Davon entfallen alleine 26 Millionen Tonnen auf die Energiewirtschaft, welches einem Anstieg von 4,5 % entspricht [51, S.5]. Grund dafür waren die erhöhten Primärenergieverbräuche der Industrie und Haushalte sowie eine stärkere Kohleverstromung infolge der steigenden Gaspreise, welcher die Erzeugung von Strom aus Kohle wirtschaftlicher gestaltete (s. Kapitel 2.1). Auch der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromproduktion sank um 3 % auf 42,3 % [51, S.5]. Dieser Rückgang stellt den größten Einbruch dar, welcher in Deutschland aufgezeichnet wurde.



Der Ausbau erneuerbarer Energien ging in diesem Zeitraum nur sehr langsam voran. So lag der Zubau bei lediglich 6,7 GW. Hiervon waren 75 % Photovoltaik und 25 % Onshore-Windkraft und Biomasseanlagen. Zudem wurde keine einzige Offshore-Windkraftanlage in Betrieb genommen [51, S.47 ff.].

4.2 Entwicklung eines klimaneutralen Energiesystems bis zum Jahr 2035

Mit Hilfe des Szenarios „Klimaneutrales Stromsystem 2035“ wird beschrieben, wie die ambitionierten Klimaziele der derzeitigen Bundesregierung möglichst effizient umgesetzt werden können. Besagter Rahmen baut auf dem früher erschienenen Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2045“ auf, welches die Grundlage für die Berechnungen liefert. Die Annahmen der Studie münden in der Novellierung des EEG's. Angenommen werden für das Jahr 2030 115 GW Onshore-Windkraft, 30 GW Offshore-Windkraft und 215 GW Photovoltaik [52, S.22]. Weitere Annahmen für den Ausbau der erneuerbaren Energien sind der Tabelle 4.2 zu entnehmen. Für den Bruttostromverbrauch werden 726 TWh angenommen [52, S.33]. Des Weiteren wird im Rahmen der Studie 2030 der Kohleausstieg vollzogen, sodass ausschließlich Gaskraftwerke und Pumpspeicherkraftwerke als gesicherte Leistung zur Verfügung stehen [52, S.31].

Annahmen zum Ausbau der Erneuerbaren Energien in KNS2035 und KNDE2045*							Tabelle 1
	KNS2035				KNDE2045		
	2020	2025	2030	2035	2025	2030	2035
Wind Onshore	54	77	115	157	65	80	104
Wind Offshore	8	12	30	58	11	25	41
Photovoltaik	54	108	215	309	91	150	234
Wasserkraft	5	6	6	6	6	6	6
Bioenergie	9	8	8	6	7	7	3
Summe	130	211	374	535	179	268	390
* Angaben in Gigawatt installierter elektrischer Leistung							

Abb. 4.1: Annahmen im Szenario [52, S.22]

Mit Erreichung der Ausbauziele läge in diesem Szenario der Anteil erneuerbarer Energien an der Nettostromerzeugung, inklusive Speichern und wasserstoffbasierter Energieerzeugung, bei 81,5 % und würde bis 2035 auf 87 % ansteigen [52, S.23]. Zur Erreichung dieser Ziele muss der Ausbau erneuerbarer Energien an Geschwindigkeit gewinnen. Der notwendige jährliche Bruttozubau kann in der nachfolgenden Abbildung 4.2 entnommen werden.

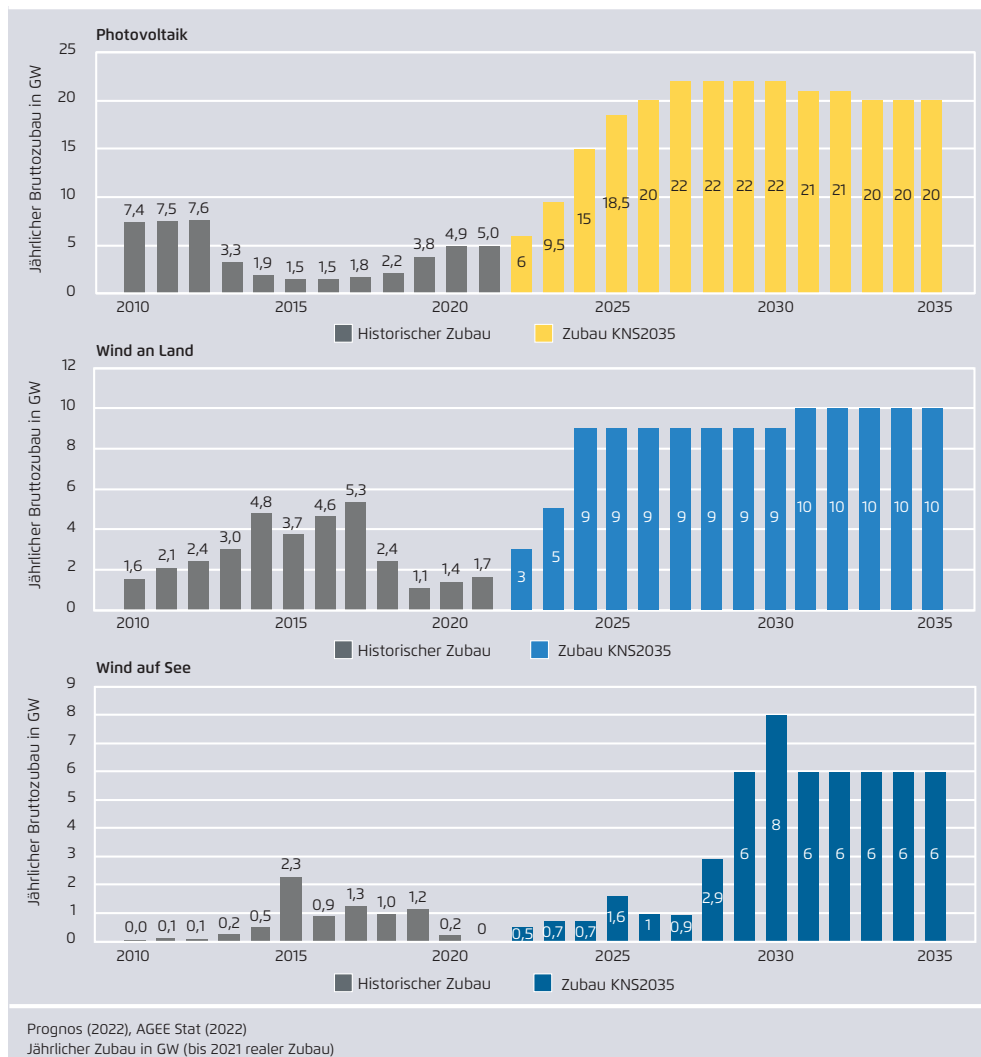


Abb. 4.2: Bruttozubau Erneuerbarer Energien im Szenario KNS2035 [52, S.24]

Nach den Ergebnissen der Studie können die volatilen erneuerbaren Energien jedoch nicht allein für eine Versorgungssicherheit garantieren. Der Kraftwerksreserve wird daher in den kommenden Jahren eine zentrale Rolle zur Sicherung der Stromversorgung unabhängig von meteorologischen Bedingungen zukommen. Zur Abdeckung der Residuallast werden in den 2030er-Jahren regelbare H₂-Ready Gaskraftwerke zum Einsatz kommen. Die Gaskraftwerke werden zu Beginn noch mit Erdgas betrieben und sukzessive durch grünen Wasserstoff ersetzt. Bei benötigten 61 GW installierter Leistung, von denen 20 GW auf etwa 3300 Vollbelastungsstunden kommen und dreiviertel des produzierten Stroms erzeugen, wird ein Zubau von 30 GW notwendig [52, S.9]. Dies entspricht in etwa 40 modernen Gaskraftwerken. Von zentraler Bedeutung ist dabei die benötigte Infrastruktur und der Standort.



Es besteht die Überlegung, ob bei Spitzenlastkraftwerken mit nur wenigen Vollbelastungsstunden im Jahr und geringeren Wirkungsgraden ein Anschluss an das Wasserstoffnetz sinnvoll ist. Hier könnte auch auf besser lager- und transportierbare Derivate wie Ammoniak als Brennstoff zurückgegriffen werden [52, S.17].

Im Falle einer Überproduktion von erneuerbarem Strom soll es künftig seltener zu Abschaltungen kommen. Vielmehr soll hier auf eine Flexibilisierung des Stromnetzes gesetzt werden. So kann nicht genutzter Strom über Elektrolyseure in grünen Wasserstoff umgewandelt und gespeichert werden. Die Studie beziffert die dafür zu installierende elektrische Leistung im Jahr 2030 auf 12 GW [52, S.11]. Die Platzierung der Elektrolysestationen an Netzentstellen verringert zusätzlich die Menge an Redispatch-Leistung. Außerdem eröffnet die Elektrifizierung des Gebäude-, Industrie- und Verkehrssektors neue Möglichkeiten. So können Wärmepumpen in Zeiten hoher Erzeugung zugeschaltet werden, um nicht genutzten Strom in Wärme umzuwandeln und zu speichern. Ähnlich sollen Industrieprozesse elektrifiziert werden, um Überschussstrom zu zwischenspeichern. Auch der Elektromobilität spielt dabei eine wichtige Rolle. Die in batteriebetriebenen Elektroautos enthaltenen Speicher sollen den Strom sowohl elektrisch zwischenspeichern als auch bei Bedarf ins Netz abgeben können (Bilaterales Laden bzw. Vehicle-to-Grid).

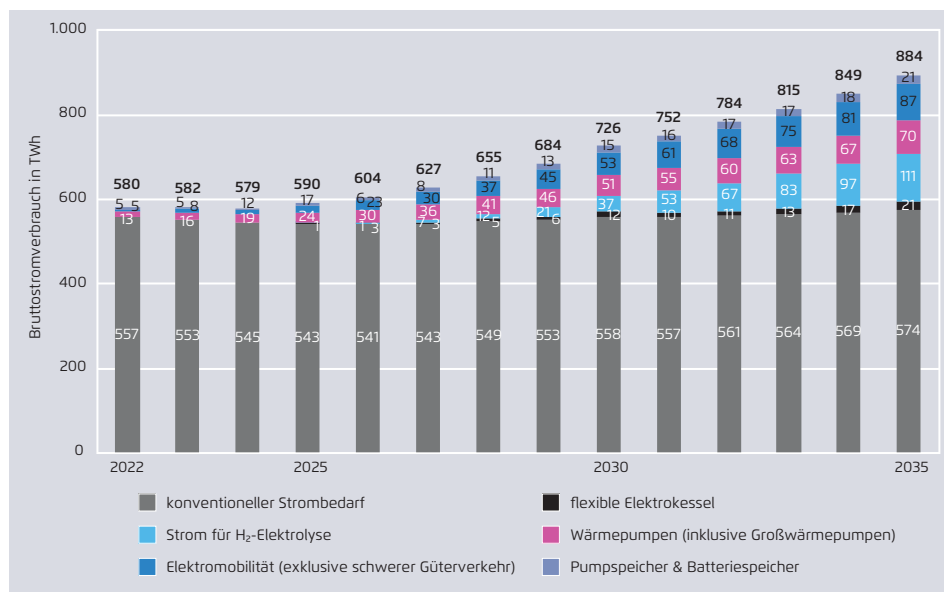


Abb. 4.3: Bruttostromverbrauch im Szenario KNS2035 [52, S.33]

Insgesamt ist in Abbildung 4.2 erkennbar, dass der steigende Stromverbrauch gleichzeitig der Flexibilität des Stromnetzes dient und so die Nutzung erneuerbarer Energien maximiert, indem Lasten intelligent zu- und abschaltet werden können. Der konventionelle Stromverbrauch wird hier als weitestgehend konstant



angenommen.

4.3 Entwicklung eines klimaneutralen Energiesystems bis zum Jahr 2045

In der Studie „Energiewende im Sozialen Raum“ wird der Weg zu einer klimaneutralen Energieversorgungsstruktur im Jahr 2045 aufgezeigt. Die Studie geht somit mit den Zielen der Bundesregierung einher. Die Annahmen stammen aus dem „Ariadne-Report“ des PIK [53, S.150]. Die Ausarbeitung betrachtet das „Fokus PV Szenario“, da davon ausgegangen wird, dass die Akzeptanz für Windkraft und Trassenausbau in der Bevölkerung gering bleibt. Zudem bezieht die Studie die aktuellen Ereignisse des Ukraine-Krieges nicht mit ein und muss daher im Hinblick auf Laufzeitverlängerungen für Atom- und Kohlekraftwerke differenziert betrachtet werden. Basierend auf dem Modell SCOPE-Path, das die Entwicklung des künftigen europäischen Strommarktes zeigt, wird ein Szenario entwickelt, in dem das Ziel der Klimaneutralität möglichst kostenoptimiert erreicht wird. Grundlage für Stromerzeugung und -verbrauch bot das Wetterjahr 2012. Dieses zeichnet sich speziell durch eine lange Kälteperiode und niedrige Erträge aus Windkraft aus. Damit soll indirekt auch die Versorgungssicherheit betrachtet werden [54, S.2].

Die Studie bezieht sich auf ein PV-Fokussiertes Szenario. Hierbei wird aufgrund von Genehmigungen, Naturschutz, fehlender Flächenausweisung und fehlender Akzeptanz davon ausgegangen, dass weniger Windkraft, dafür aber mehr Photovoltaik ausgebaut wird [54, S.4]. Des Weiteren soll angenommen werden, dass die Kapazitäten der Wasserkraft erschöpft sind und eine Nutzung von Geothermie für Stromerzeugung nicht wirtschaftlich ist. Der Ausbau von Biomasse ist aufgrund von Anbauflächenkonflikten und Biodiversität beschränkt, sodass sich Photovoltaik und Windenergie zu den zentralen Technologien zur Stromerzeugung durchsetzen [54, S.6].

Die Studie geht von einem steigenden Bruttostromverbrauch bis zum Jahr 2045 in Höhe von 1 015 TWh aus [54, S.10]. Zur Sicherung der Versorgung ist eine Verfünffachung der installierten PV- und Windkraftkapazitäten bis 2045 notwendig. Diese betragen 2021 noch 116 GW und steigen in diesem Szenario auf 550 GW an [54, S.7]. Die zur Deckung der Nachfrage benötigte Leistung von PV beläuft sich in diesem Szenario auf 400 GW 2045, während Onshore-Windkraft 2045 130 GW ausmacht. Dennoch ist die Nettostromerzeugung der Windkraftanlagen auf Grund von höheren Volllaststunden etwas größer [54, S.7]. Offshore-Windkraft macht in diesem Szenario 40 GW aus, wobei jedoch nur 50 % davon zur Einspeisung in das Netz genutzt werden. Die übrigen 50 % werden durch Elektrolyseure für die Wasserstoffbereitstellung verwendet. Grund hierfür ist die angenommene geringere Akzeptanz der Bevölkerung für Stromtrassen [54, S.7]. Zudem zeigt das Szenario, dass mit nur 38 TWh Stromimporten die Nachfrage fast vollständig inländisch gedeckt werden kann [54, S.16].



Zur Deckung der Residuallast wird 58 GW Gaskraftwerksleistung benötigt. Diese müssen allerdings, wie in 4.2 schon ausgeführt, bereits 2030 installiert sein. Der Anteil von Erdgas sinkt im Laufe der Jahre weiter, bis im Jahr 2045 alle Gaskraftwerke mit grünem Wasserstoff betrieben werden [54, S.8].

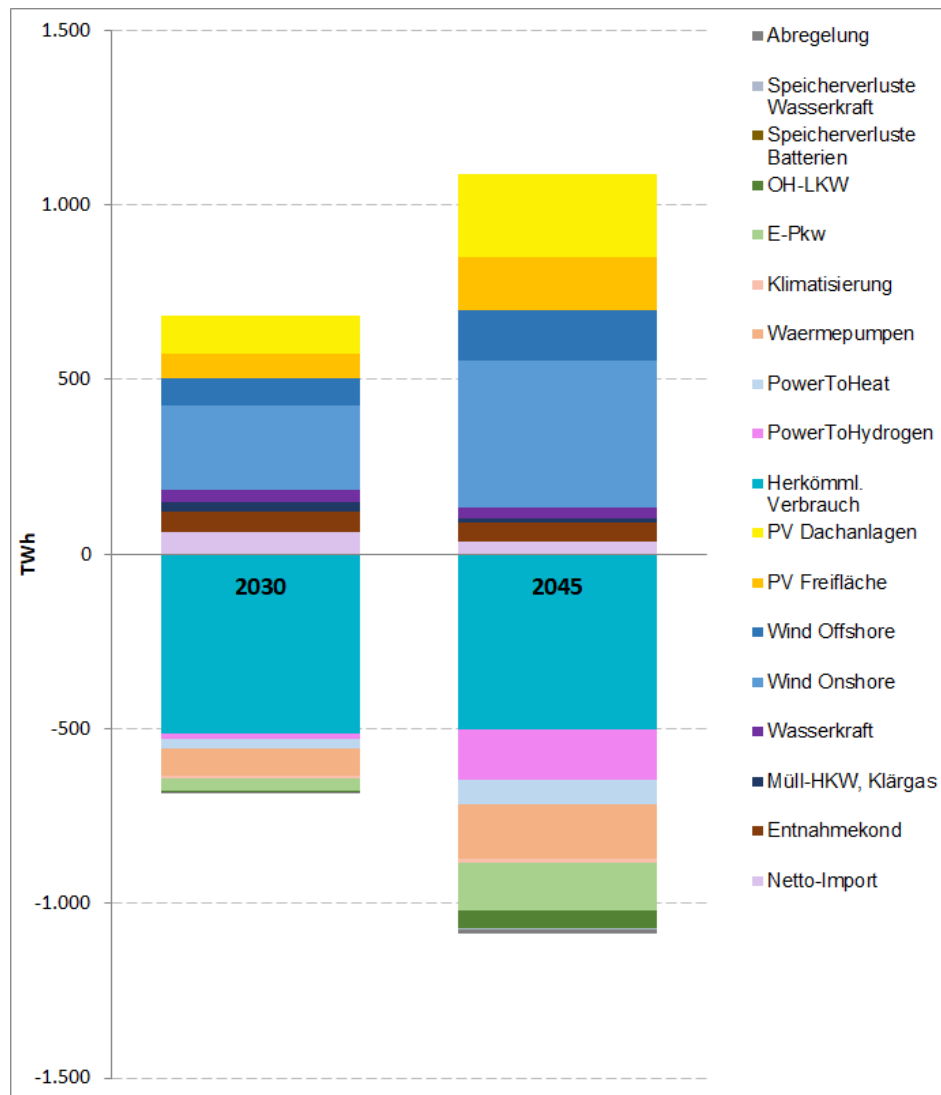


Abb. 4.4: Energieerzeugung und -verbrauch 2030 und 2045 im Vergleich [54, S.9]

Auch in diesem Szenario überwiegen flexible Lasten im Energiesystem. Power-to-heat und Power-to-hydrogen sowie die flächendeckende Verbreitung von Elektrofahrzeugen prägen die energetische Landschaft in 2045. Der Anteil von Wärmepum-



pen zur Bereitstellung von Raumwärme steigt auf 54 %, die verbliebenen Wasserstoff-Gaskessel machen 9 % aus. Mit Power-to-heat Anlagen wie beispielsweise Elektrokesseln werden Fernwärmenetze aufgebaut, um die industriellen Anforderungen nach Hochtemperaturwärme zu decken. Großwärmepumpen werden zur Nieder temperaturwärmeversorgung (unter 100 °C) eingesetzt [54, S.10ff]. Diese Technologien dienen auch hier unter Zuhilfenahme der Gas- und Wasserkraft als Regelreserven zur Frequenz- und Spannungshaltung.

4.4 Vergleich der Studien im Hinblick auf die Entwicklung der Kraftwerksreserven

Im ersten Schritt ist festzustellen, dass beide Studien auf unterschiedlichen Wegen das gleiche Ergebnis liefern, die Klimaneutralität Deutschlands bis zum Jahr 2035 bzw. 2045. Zukünftige Maßnahmen zur Frequenzstabilisierung und zum Redispatch sollen vorrangig mit Gas- sowie Wasserkraftwerken abgedeckt werden. Zu Beginn werden die Gaskraftwerke mit Erdgas betrieben, um diese anschließend sukzessive auf grünen Wasserstoff umzurüsten. Für die zusätzliche Überbrückung von Dunkelflauten müssen weitere H₂-ready Gaskraftwerke mit einer Gesamtleistung von etwa 28 GW - 30 GW bis 2030 zugebaut werden. Durch bilaterale flexible Verbraucher sollen auftretende Lastspitzen in der Erzeugung sowie Verbrauch ausgeglichen werden. Zudem soll dadurch die Abschaltung von erneuerbaren Energien bei Erzeugungsspitzen verringert werden. Zu den flexiblen Verbrauchern zählen laut den Studien unter anderem Wärmepumpen, Elektroautos mit Vehicle-to-Grid Funktion, Energie- sowie Wärmespeicher und Power-to-X Anwendungen. All diese Techniken vereinen die Möglichkeit, schnell und flexibel agieren zu können und damit Last- sowie Erzeugungsspitzen zu dämpfen.

Außerdem ist darauf hinzuweisen, dass im Zuge des Kohleausstiegs die Netzreserve und Sicherheitsbereitschaft zur Reserveleistungsvorhaltung wegfallen werden. Der damit verbundene Wegfall von Momentanreserve kann durch die Flexibilisierung des Stromnetzes und durch eine erhöhte Leistungsvorhaltung in der Primärregelreserve kompensiert werden. Damit rücken gerade großflächig angelegte Batteriespeicher in den Blickpunkt. Diese können sehr schnell große Leistungen abrufen und stellen damit ein erhebliches Potenzial dar. Zudem kann eine weitere Systemdienstleistung, welche schneller als die Primärregelreserve eingreift, Abhilfe schaffen. In dieser sind dann Teilnehmer gebündelt, die extrem schnell in den Markt eingreifen können und vor allem damit die Frequenz stabilisieren können.

Um den in den Studien geplanten Zubau zu erreichen, werden jedoch kaum Anreize geliefert. Aufgrund des fortschreitenden Ausbaus der Erneuerbaren werden die Betriebsstunden der dringend gebrauchten Gaskraftwerke weiter reduziert (vgl. Kap. 2.1). Durch mangelnde Betriebsstunden wird der Betrieb solcher Grenzkostenkraftwerke immer unwirtschaftlicher. Folglich wird der Bau dadurch immer un-



wahrscheinlicher. Um diesen Effekten entgegenzuwirken, muss die vorgehaltene Leistung, auch wenn diese nicht abgerufen wird, vergütet werden. Der Strommarkt würde weiterhin nach einer Merit-Order funktionieren und erbrachte elektrische Arbeit vergüten, jedoch durch einen Kapazitätsmarkt auch vorgehaltene Kraftwerksleistung.

Des Weiteren besitzt Deutschland noch keine funktionierende Wasserstoffwirtschaft. Da der gesamte Bedarf an grünem Wasserstoff nicht durch nationale Produktion gedeckt werden kann, muss die Differenz aus anderen Ländern importiert werden. Hierfür gibt es jedoch keine massentauglichen Transportmöglichkeiten, Lieferverträge und Umschlagplätze. Eine Umrüstung der geplanten und bereits gebauten LNG-Terminals ist ohne etwaige größere Investitionen nicht problemlos möglich [30].



5 Zusammenfassung und Ausblick

Die derzeitige Versorgungslage der fossilen Energieträger hat sich mit Hinblick auf die Kraftwerksreserven erst einmal entspannt. Die Braunkohlekraftwerke aus der Sicherheitsbereitschaft können über werkseigene Tagebaue und Schienensysteme versorgt werden. Die Pegelstände der Versorgungsrouten für die Steinkohlekraftwerke haben sich ebenfalls erholt. Vereinzelt können Steinkohlekraftwerke jedoch nicht am Markt teilnehmen aufgrund von mangelndem Personal und Alter der Kraftwerke. Zudem wurden, wie am Beispiel Saarland gezeigt, Verordnungen erlassen, um eine Brennstoffbeschaffung zu vereinfachen. Die angespannteste Versorgungslage zeigt derzeit das Erdgas auf. Trotz der geplanten Inbetriebnahme zweier FSRU's Anfang Dezember und sehr gut gefüllten Gasspeichern kann keine Entwarnung gegeben werden. Derzeit profitiert Deutschland von milden Wintertagen und einem daraus reduzierten Gasverbrauch sowie weiteren Einsparmaßnahmen in der Industrie. Die Versorgungslage gestaltet sich damit äußerst dynamisch und ist schwer vorherzusagen. Zusätzlich wurde ein von der Bundesregierung in Auftrag gegebener Stresstest angefertigt, um potenzielle Versorgungslücken aufzuzeigen und rechtzeitig Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Zusammenfassend sei noch einmal gesagt, dass beide Studien mit unterschiedlichen Ansätzen ähnliche Ergebnisse liefern. Es wird ein weitreichender Ausbau von erneuerbaren Energien, Batteriespeicherkapazitäten, H₂-ready Gaskraftwerken und dem damit verbundenen Netzausbau bzw. -modernisierung.

Aufgrund der genannten Kritikpunkte ist das Erreichen des Ausbauziels kaum bzw. nicht erreichbar. Hinzukommen weitere Probleme wie Materialengpässe und Personalmangel. Zudem kann ohne zusätzliche Gesetzesänderungen von ca. fünf Jahren Planungs- und Bauzeit ausgegangen werden (Planung, Bau und Inbetriebnahme). Demnach scheint nicht nur der zeitliche und personelle, sondern auch der gesetzliche Rahmen für das Erreichen der Ausbauziele nicht vollumfänglich gegeben. Folglich werden Reserven aus Kohlekraftwerken auch in ferner Zukunft weiter bestehen müssen, auch wenn die Wirtschaftlichkeit durch mangelnde Betriebsstunden auch in diesem Fall ungeklärt bleibt.



6 Literatur

- [1] H. Wirth. *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland*. Report. Fraunhofer ISE, Sep. 2022 (siehe S. 7).
- [2] Justus Haucap. „Braucht Deutschland einen Kapazitätsmarkt für eine sichere Stromversorgung?“ In: *Zeitschrift für Wirtschaftspolitik* 62 (Dez. 2013), S. 257–269 (siehe S. 6).
- [3] T. Wawer. *Elektrizitätswirtschaft. Eine praxisorientierte Einführung in Strommärkte und Stromhandel*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2022 (siehe S. 8, 9).
- [4] N. Reitsam. „Potentiale einer solidarischen Eigenstromerzeugung der Industrie zur Bereitstellung von Backup-Leistung auf dem deutschen Strommarkt“. Dissertation. München: Technische Universität München, 2022 (siehe S. 6–8, 11–13).
- [5] ENTSO-E. *Frequency Containment Reserves (FCR)*. 2022. URL: https://www.entsoe.eu/network_codes/eb/fcr/#basic-principle (besucht am 16.10.2022) (siehe S. 10).
- [6] BNetzA. *Festlegungsverfahren zu den Ausschreibungsbedingungen und Veröffentlichungspflichten für Primärregelleistung*. Beschluss. 2011.
- [7] BNetzA. *Festlegungsverfahren zu den Ausschreibungsbedingungen und Veröffentlichungspflichten für Sekundärregelung*. Beschluss. 2017 (siehe S. 11).
- [8] BNetzA. *Festlegungsverfahren zu den Ausschreibungsbedingungen und Veröffentlichungspflichten für Minutenreserve*. Beschluss. 2017.
- [9] Deutschland ÜNB. *Internetplattform zur Vergabe von Regelleistung*. 2022. URL: <https://www.regelleistung.net/ext/> (besucht am 17.10.2022) (siehe S. 10–12, 14).
- [10] Next-Kraftwerke. *Was ist Primärregelleistung (PRL)/ Frequency Containment Reserve (FCR)?* 2022. URL: <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/primaerreserve-primaerregelleistung> (besucht am 28.11.2022) (siehe S. 10).
- [11] Next-Kraftwerke. *Was ist Sekundärregelleistung (SRL)/ automatic Frequency Restoration Reserves (aFRR)?* 2022. URL: <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/sekundaerreserve> (besucht am 17.10.2022).
- [12] K. Angerer und S. Krohns. *Stromhandel auf europäischen Spotmärkten. Bewertung von technischen Flexibilitätsoptionen am Beispiel des Intraday-Handels*. Berlin: Shaker Verlag, 2018 (siehe S. 9).
- [13] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. *Stromhandel auf europäischen Spotmärkten. Bewertung von technischen Flexibilitätsoptionen am Beispiel des Intraday-Handels*. Berlin: Shaker Verlag, 2018.
- [14] I. Zenke, C. Dessau und T. Heymann. 2016. URL: <https://www.bbh-blog.de/alle-themen/energie/kommission-macht-weg-fuer-kapazitaetsreserve-frei/> (besucht am 17.10.2022) (siehe S. 8).



- [15] F. Huneke M.Brinkhaus C. Troost. *Zukünftige energiewirtschaftliche Rolle der kleinen Wasserkraft*. Berlin: Energy Brainpool, 2020 (siehe S. 12).
- [16] Ingenieurbüro Floecksmühle GmbH. *Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz. Teilvorhaben II d: Wasserkraft - Zwischenbericht*. Mai 2018 (siehe S. 13).
- [17] F. Knoll et al. *Momentanreserve in einem überwiegend EE-basierten Stromsystem. Eine interdisziplinäre Einführung unter Berücksichtigung technischer, ökonomischer und juristischer Aspekte*. Report. Universität Greifswald, Universität Rostock und Hochschule Stralsund, Feb. 2021 (siehe S. 15).
- [18] A. Lechner R. Schürhuber und W. Gawlik. „Bereitstellung synthetischer Schwungmassedurch Wasserkraftwerke. Eine praxisorientierte Einführung in Strommärkte und Stromhandel“. In: *Elektrotechnik und Informationstechnik* 133.8 (2016), S. 388–394 (siehe S. 15).
- [19] M. Sterner und I. Stadler. *Energiespeicher. Bedarf, Technologien, Integration*. .2., korrigierte und ergänzte Auflage. Springer Vieweg, 2017 (siehe S. 15).
- [20] Next-Kraftwerke. *Was ist Regelenenergie*. 2022. URL: <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/regelenenergie> (besucht am 17.10.2022).
- [21] BNetzA. *Monitoringbericht 2021*. Report. BNetzA, März 2022 (siehe S. 11, 14, 15, 19).
- [22] EnWG. *Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung. Energiewirtschaftsgesetz. Gesetz*. Version 2022. 2005 (siehe S. 17, 18, 21).
- [23] Next-Kraftwerke. *Was sind Netzreserve, Kapazitätsreserve und Sicherheitsbereitschaft?* 2022. URL: <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/netzreserve-kapazitaetsreserve-sicherheitsbereitschaft#kapazitaetsreserve-ausschreibungsverfahren-und-zuschlge> (besucht am 22.10.2022) (siehe S. 17, 19, 21, 22).
- [24] BNetzA. *Feststellung des Bedarfs an Netzreserve für den Winter 2022/2023 sowie den Betrachtungszeitraum April 2023 bis März 2024*. Bericht. BNetzA, Apr. 2022 (siehe S. 17).
- [25] BNetzA. *Kraftwerksliste Bundesnetzagentur (bundesweit; alle Netz- und Umspannebenen) Stand: 31.05.2022*. Excel-Tabelle. Mai 2022 (siehe S. 16, 18, 20, 21, 23, 24, 26).
- [26] BMWi. *Weißbuch. Ein Strommarkt für die Energiewende*. Berlin: BMWi, Juli 2015.
- [27] Patrick Graichen, Mara Marthe Kleiner und Christoph Podewils. *Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2015. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen*. Studie. Agora Energiewende, Jan. 2016 (siehe S. 21).
- [28] Bundesregierung. *Weniger Gasverbrauch im Ernstfall*. Juli 2022. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/gasersatz-reserve-2048304> (besucht am 25.10.2022).



- [29] Bundesregierung. *Reserve für Stromproduktion nutzen*. Okt. 2022. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/versorgungsreserve-2130276> (besucht am 25.10.2022).
- [30] Fraunhofer Institute for Systems und Innovation Research ISI. *Conversion of LNG Terminals for Liquid Hydrogen or Ammonia. Analysis of Technical Feasibility under Economic Considerations*. Karlsruhe: Fraunhofer Institute for Systems und Innovation Research ISI, Nov. 2022 (siehe S. 36).
- [31] LEAG. *Geschäftsfeld Kraftwerke*. Nov. 2022. URL: <https://www.leag.de/de/geschaeftsfelder/kraftwerke/> (besucht am 01.11.2022) (siehe S. 23).
- [32] Guido Steffen. *Ihre Anfrage zur Rohstoffversorgungslage*. E-Mail. Okt. 2022 (siehe S. 24).
- [33] Bundesregierung. *Steinkohlebergbau ist Geschichte*. Nov. 2022. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/service/archiv/steinkohlebergbau-ist-geschichte-1563902> (besucht am 21.12.2018) (siehe S. 24).
- [34] EnBW Energie Baden-Württemberg AG. *EnBW bereitet Kohlekraftwerke auf verstärkten Betrieb im Winter vor – Versorgungssicherheit oberste Priorität*. Nov. 2022. URL: https://www.enbw.com/unternehmen/presse/enbw_zum_ekbg.html (besucht am 11.07.2022) (siehe S. 24).
- [35] STEAG. *STEAG bringt 2,5 Gigawatt zusätzliche Kraftwerksleistung zurück an den Markt*. Nov. 2022. URL: <https://www.steag.com/de/pressemitteilung/21-10-2022-steag-bringt-kraftwerk-bexbach-frueher-zurueck-an-den-markt> (besucht am 21.10.2022) (siehe S. 24).
- [36] Ministerium für Wirtschaft Innovation Digitales und Energie - Saarland. *Kohlekraftwerke wieder ans Netz: Logistikbranche vor großen Herausforderungen*. Okt. 2022. URL: https://www.saarland.de/mwide/DE/aktuelles/aktuelle-meldungen/medieninfos/pm_2022_07_21_kohlekraftwerke_als_herausforderung_logistikbranche.html (besucht am 21.07.2022) (siehe S. 24).
- [37] acatech/Leopoldina/Akademienunion (Hrsg.) *Welche Auswirkungen hat der Ukrainekrieg auf die Energiepreise und Versorgungssicherheit in Europa?* Impuls. Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS), Juli 2022, S. 17 (siehe S. 25).
- [38] Bundesregierung. *Erster Anleger für Flüssigerdgaslieferung fertig*. Dez. 2022. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/suche/erster-lng-terminal-2143122> (besucht am 16.11.2022) (siehe S. 25).
- [39] acatech/Leopoldina/Akademienunion (Hrsg.) *Welche Auswirkungen hat der Ukrainekrieg auf die Energiepreise und Versorgungssicherheit in Europa?* Impuls. Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS), Juli 2022, S. 15 (siehe S. 25).
- [40] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. *Notfallplan Gas für die Bundesrepublik Deutschland*. Verordnung. Sep. 2019 (siehe S. 25).



- [41] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. *Ölkrisevorsorge und -management*. Nov. 2022. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/mineraloel-oelbevorratung-transport-oelreserven.html> (siehe S. 26).
- [42] IEA. *Oil Market Report, March 2022*. Nov. 2022. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/9aea25c1-5450-49db-8e1f-a67c0212720c/-16MAR2022_OilMarketReport.pdf (besucht am 16.03.2022) (siehe S. 26).
- [43] 50Hertz/TenneT/TransnetBW/Amperion. *Abschlussbericht Sonderanalysen Winter 2022/2023*. Nov. 2022. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/20220914-stresstest-strom-ergebnisse-langfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=18 (besucht am 13.09.2022) (siehe S. 27).
- [44] EnSiG. *Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energiesicherungsgesetzes 1975 und anderer energiewirtschaftlicher Vorschriften. Energiesicherungsgesetz. Gesetz. Version 2022. 1975* (siehe S. 27).
- [45] Bundestag. *Bundestag beschließt AKW-Laufzeitverlängerung bis Mitte April 2023*. Dez. 2022. URL: <https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2022/kw45-de-atomgesetz-freitag-917474> (besucht am 11.11.2022) (siehe S. 28).
- [46] BNetzA. *Rückkehr von Kohlekraftwerken an den Strommarkt*. Dez. 2022. URL: <https://www.smard.de/home/rueckkehr-von-kohlekraftwerken-an-den-strommarkt-209208> (besucht am 21.11.2022) (siehe S. 28).
- [47] Mercator Research Institut on Global Commons und Climate Change (MCC). *So schnell tickt die CO₂-Uhr*. Nov. 2022. URL: <https://www.mcc-berlin.net/forschung/co2-budget.html> (siehe S. 28).
- [48] Umweltbundesamt. *Übersicht zur Entwicklung der energiebedingten Emissionen und Brennstoffeinsätze in Deutschland 1990 – 2020*. Report. Umweltbundesamt, Mai 2022, S. 11 (siehe S. 28).
- [49] SPD / Bündnis90/Die Grünen / FDP. *Mehr Fortschritt Wagen. Bündnis Für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit*. Berlin: SPD / Bündnis90/Die Grünen / FPD, Nov. 2021 (siehe S. 28).
- [50] RWE AG. *Verständigung auf Kohleausstieg 2030 und Stärkung der Versorgungssicherheit in der Energiekrise*. Nov. 2022. URL: <https://www.rwe.com/presse/rwe-ag/2022-10-04-verstaendigung-auf-kohleausstieg-2030-staerkung-der-versorgungssicherheit-in-energiekrise> (besucht am 04.10.2022) (siehe S. 29).
- [51] Agora Energiewende. *Die Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2021. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2022*. Berlin: Agora Energiewende, Jan. 2022 (siehe S. 29, 30).
- [52] Agora Energiewende. *Klimaneutrales Stromsystem 2035. Wie der deutsche Stromsektor bis zum Jahr 2035 klimaneutral werden kann*. Berlin: Agora Energiewende, Prognos, Consentec, Juni 2022 (siehe S. 30–32).



- [53] Gunnar Luderer (PIK) et al. *Ariadne Report / Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045. Szenarien und Pfade im Modellvergleich*. Potsdam: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), Okt. 2021 (siehe S. 33).
- [54] Andrea Wiesholzer et al. *Verbundvorhaben: ESRa - Energiewende im sozialen Raum. Produkt 3.3 - Klimaneutrale Energiesysteme und zukunftsfähige Qualifikationsprofile*. Berlin: Germanwatch, Fraunhofer IEE, Global Climate Forum, Juni 2022 (siehe S. 33–35).
- [55] Europäische Kommission. *Klima- und energiepolitischer Rahmen bis 2030*. Dez. 2022. URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework_de.
- [56] Destatis. *Stromproduktion im 1. Halbjahr 2022*. Nov. 2022. URL: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/09/PD22_374_43312.html (siehe S. 26).
- [57] BNetzA. *Bundesnetzagentur startet Datenerhebung bei Gasverbrauchern*. Nov. 2022. URL: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2022/20220503_DatenerhebungGas.html (besucht am 03.05.2022) (siehe S. 25).
- [58] Redaktionsnetzwerk Deutschland. *Wartungen an AKWs verzögern sich: Droht Frankreich nun ein Blackout?* Nov. 2022. URL: <https://www.rnd.de/wirtschaft/frankreich-droht-strom-engpass-wegen-ruhender-atomkraftwerke-AP3JLDZUC4WVUNELTT6PX4FX3A.html> (besucht am 18.11.2022) (siehe S. 27).
- [59] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs e.V. *Füllstände der Gasspeicher für Deutschland mit Reichweitenprognose*. Dez. 2022. URL: <https://www.dvgw.de/themen/sicherheit/versorgungssicherheit-gas/fuellstaende-der-gasspeicher-fuer-deutschland-mit-reichweitenprognose#/2022-11-13> (besucht am 21.12.2022) (siehe S. 25).



7 Anhang

Anhangsverzeichnis