



Anna und Lorenz JARASS

Integration von erneuerbarem Strom

Stromüberschüsse  Stromdefizite

Integration von erneuerbarem Strom

Stromüberschüsse  Stromdefizite

Übersicht	4
Inhaltsverzeichnis	7
Teil I : Stromverbrauch und Stromproduktion	12
1 Zukünftige Stromversorgung in Deutschland.....	13
2 Wachsende Stromüberschüsse und Stromdefizite	25
3 Ausgleich von Stromverbrauch und Stromproduktion	43
4 Reservekraftwerksbedarf gemäß Bundesnetzagentur	65
Teil II : Stromtransport.....	78
5 Stromnetz	79
6 Ausgleich von Stromtransportbedarf und zulässigem Stromtransport	93
7 Regionale Netzplanung	110
8 Überregionale Netzplanung: Netzentwicklungsplan 2025	120
Anhang.....	140
Fußnoten.....	156
Quellen	163

5 Stromnetz

5.1 Verbundnetz

Die deutsche Stromversorgung besteht aus einem Verbundnetz, das alle Kraftwerke und Stromverbraucher miteinander verbindet. Alle Teilnetze innerhalb dieses Verbundes müssen mit der Standardfrequenz 50 Hertz exakt synchron arbeiten, um einen reibungslosen Stromaustausch innerhalb des Gesamtsystems zu gewährleisten.¹³⁰

Früher speisten in das Netz v.a. konventionelle Großkraftwerke ein, die nahe der Kohleverfügbarkeiten entstanden waren oder zur Kühlung an den größeren Flüssen.¹³¹ Durch die Energiewende speisen nun immer mehr stark fluktuierende erneuerbare Kraftwerke ein.

Abb. 5.1 zeigt das deutsche Höchstspannungsnetz 2016 und geplante Erweiterungen. Die gemäß Netzentwicklungsplan 2025 zusätzlichen Leitungsplanungen zeigt die spätere Abb. 8.2.

Das Stromnetz besteht heute fast ausnahmslos aus Drehstromleitungen, meist mit zwei getrennten Systemen mit je drei Phasen und entsprechend je drei Leiterseilen bzw. Leiterseilbündeln.

5.1.1 Regelzone

Das deutsche Verbundnetz ist in vier sogenannte Regelzonen gegliedert¹³², entsprechend den vier großen überregionalen Übertragungsnetzbetreibern 50Hertz (früher Vattenfall), Amprion (früher RWE), TenneT (früher E.ON) und TransnetBW (früher EnBW). Die Regelzonen sind miteinander und mit den benachbarten ausländischen Netzen über Kuppelstellen verbunden.

Innerhalb einer Regelzone ist der jeweilige Übertragungsnetzbetreiber für die Versorgungssicherheit aller dort an das Netz angeschlossenen Stromverbraucher verantwortlich, insbesondere auch für die Frequenz- und Spannungsstabilität und die schnellstmögliche Behebung von Störungen.

Die sichere Versorgung aller ans Netz angeschlossenen Kunden erfordert, dass Differenzen zwischen Stromverbrauch und Stromproduktion sofort (instantan) ausgeglichen werden durch geeignete Maßnahmen sowohl auf der Verbrauchsseite als auch auf der Produktionsseite.

Das Gesamtsystem der in ein Netz einspeisenden Kraftwerke muss also so ausgelegt werden, dass durch entsprechende Regelung der verschiedenen Kraftwerke die momentane Stromproduktion gerade der momentanen Stromnachfrage entspricht.

Im öffentlichen Netz, das der Stromversorgung dient, gelten zumindest in Deutschland extrem hohe Standards der Versorgungssicherheit. Die hohe Sicherheit und Zuverlässigkeit der Stromversorgung, die den Stromkunden in Deutschland zur Verfügung steht, wird v.a. dadurch erreicht, dass eine hinreichende Redundanz der technischen Netzeinrichtungen gegeben ist.¹³³ Hierfür wird das (n-1)-Kriterium angewendet, siehe Kasten 5.1.

Abb. 5.1 : Deutsches Höchstspannungsnetz, 2016



Quelle: [VDE 2016].

Kasten 5.1 : Gesicherte Stromversorgung bei Störfällen, (n-1)-Kriterium

Fällt von n-vielen Betriebsmitteln, die im ungestörten Fall zur Verfügung stehen, **eines** durch eine Störung aus, so müssen die verbleibenden (n-1)-vielen Betriebsmittel den Stromverbrauch immer noch uneingeschränkt decken können. Z.B. darf der Ausfall **eines** Transformators oder **eines** Leitungssystems zu keinen für den Verbraucher spürbaren Versorgungsunterbrechungen führen.

Durch die grundsätzlich geforderte (n-1)-Sicherheit beim Netzausbau und das technische Regelwerk verschiedener einzuhaltender DIN-Normen ist das deutsche Stromnetz im Vergleich zu anderen Ländern relativ sicher ausgelegt.¹³⁴

Deshalb können nicht nur Krankenhäuser und Industriebetriebe, sondern auch private Haushalte damit rechnen, dass jährlich höchstens wenige Male und nur für durchschnittlich 20 Minuten pro Jahr die Stromversorgung ausfällt, abgesehen von zum Glück bisher äußerst seltenen extremen Wetterereignissen oder Schaltfehlern.

5.1.2 Unterschiedliche Stromspannungen

Alle Kraftwerke sind mit allen Stromverbrauchern über die verschiedenen Spannungsebenen der Leitungsnetze mit maximalen Zeitverzögerungen im Millisekundenbereich verbunden.

Der momentan in einer Leitung transportierte Strom, elektrotechnisch als übertragene Leistung bezeichnet, ist das Produkt aus Spannung mal Stromstärke. Leiterseile erwärmen sich wegen ihres elektrischen Widerstands beim Stromdurchgang, und zwar mit dem Quadrat der Stromstärke. Bei einer Erhöhung der Stromstärke wächst also der Stromverlust mit dem Quadrat der Stromstärke.

Zudem dürfen normale Leiterseile keinesfalls auf mehr als etwa 80°C erwärmt werden. Damit ist bei gegebenem Seilquerschnitt der zulässigen Stromstärke eine klare technische Schranke gesetzt. Deshalb ist es zur Erhöhung der übertragbaren Leistung besser, statt der Stromstärke die Spannung zu erhöhen.

Den verschiedenen technischen Aufgaben, insbesondere aber der Reduzierung der Stromtransportverluste, dienen die verschiedenen Spannungsebenen:

- **Niederspannungsnetz** (bis 1 kV) mit 400 V (Drehstrom) oder 230 V (Wechselstrom) zur Versorgung kleinerer Endverbraucher.
- **Mittelspannungsnetz** (1 kV bis unter 110 kV), überwiegend im Bereich von 20 kV zur Verteilung in der Fläche und zur Versorgung größerer Gewerbebetriebe. In Verdichtungsräumen werden Mittelspannungsleitungen seit Längerem als Erdkabel ausgeführt, deshalb beträgt im Mittelspannungsnetz der Gesamtverkabelungsgrad bereits ca. 70%.
- **Hochspannungsnetz** (110 kV), meist 110-kV-Drehstrom-Freileitungen, aber immer häufiger auch in Erdkabelausführung, zum Anschluss von großen Verbrauchern und zur Netzanbindung von mittelgroßen Kraftwerken.
- **Höchstspannungsnetz** (über 110 kV), meist 380-kV-Drehstrom-Freileitungen, zum Transport über Entfernungen von Hunderten von Kilometern sowie zum Anschluss von Großkraftwerken. Für

den Netzanschluss der Offshore-Windparks in der Nordsee werden 320-kV-Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitungen (HGÜ) verwendet.

5.2 Optimierung des Netzausbaus: Nicht zu viel und nicht zu wenig

Der Begriff des Netzausbaus umfasst folgende Alternativen zur Erhöhung des maximal transportierbaren Stroms:

- Optimierung des bestehenden Stromnetzes,
- Netzverstärkung sowie Ersatz bestehender Stromleitungen,
- Neubau von Stromleitungen.

Das Stromversorgungssystem wird durch den Ausbau der stark fluktuierenden erneuerbaren Stromproduktion¹³⁵ massiv verändert. Der zeitliche und räumliche Ausgleich von Stromverbrauch und Stromproduktion kann durch unterschiedliche Maßnahmen erreicht werden, die in Kap. 6 näher erläutert werden. Ein Netzausbau in kritischen Regionen ist eine dieser Maßnahmen.

Die Netzbetreiber müssen die Abnahme, Übertragung und Verteilung von erneuerbarem Strom sicherstellen¹³⁶, bei Engpässen sind die Netzbetreiber "verpflichtet, unverzüglich ihre Netze entsprechend dem Stand der Technik zu optimieren, zu verstärken und auszubauen"¹³⁷.

Andererseits besteht aber auch eine gesetzliche Beschränkung der Verpflichtung zum Netzausbau, da der Umfang des Netzausbaus wirtschaftlich zumutbar sein muss¹³⁸: "Der Netzbetreiber ist nicht zur Optimierung, zur Verstärkung und zum Ausbau seines Netzes verpflichtet, soweit dies wirtschaftlich unzumutbar ist."¹³⁹

Durch das gesetzliche Gebot der wirtschaftlichen Zumutbarkeit wird der Netzausbau also auf das volkswirtschaftlich vernünftige Maß beschränkt. Die wirtschaftliche Zumutbarkeit muss bereits bei der Netzausbauplanung berücksichtigt werden.

Das Energiewirtschaftsgesetz schreibt in § 1 neben einer möglichst sicheren, preisgünstigen, verbraucherfreundlichen und effizienten Stromversorgung gleichrangig eine umweltverträgliche Gestaltung vor. Beeinträchtigungen von Natur und Umwelt werden volkswirtschaftlich als soziale Kosten bezeichnet.¹⁴⁰ Für die Optimierung des Netzausbaus müssen also zusätzlich zu den einzelwirtschaftlichen Nutzen und Kosten die sozialen Nutzen und Kosten berücksichtigt werden, da sonst nicht sichergestellt wäre, dass der Netzausbau für die Gesamtgesellschaft mehr Nutzen als Kosten verursacht.¹⁴¹

5.2.1 Nutzen und Kosten eines Netzausbaus

Der volkswirtschaftliche Nutzen des Netzausbaus ist die Summe aus seinem einzelwirtschaftlichen und seinem sozialen Nutzen:

- Der **einzelwirtschaftliche Nutzen** resultiert u.a. aus einem niedrigeren Regel- und Reserveaufwand konventioneller Kraftwerke und geringeren Abregelungen konventioneller und erneuerbarer Kraftwerke.

- Der **soziale Nutzen** resultiert v.a. aus geringeren Abregelungen erneuerbarer Kraftwerke und der damit bewirkten Vermeidung der Emissionen von CO₂ und weiteren Schadstoffen.

Diesem volkswirtschaftlichen Nutzen des Netzausbaus stehen seine volkswirtschaftlichen Kosten gegenüber, die sich aus einzelwirtschaftlichen plus sozialen Kosten ergeben:

- **Einzelwirtschaftliche Kosten** des Netzausbaus bestehen aus den Kosten für Optimierung, Netzverstärkung und Leitungsneubau sowie den Verlust- und Betriebskosten. Die einzelwirtschaftlichen Kosten für den Netzausbau werden vom Netzbetreiber vorfinanziert und in Gestalt von Netznutzungsentgelten auf die Stromverbraucher überwälzt.
- **Soziale Kosten** des Netzausbaus entstehen insbesondere aus der Beeinträchtigung von Naturhaushalt, Erholungsmöglichkeiten, Siedlungsstrukturen und Landschaftsbild, v.a. bei der Durchquerung von landschaftlich besonders schützenswerten Regionen durch Freileitungen (z.B. Überquerung des Rennsteigs im Thüringer Wald durch die Südthüringenleitung).

Die jeweiligen technischen Maßnahmen zur Erhöhung des zulässigen Stromtransports führen zu unterschiedlich hohen volkswirtschaftlichen Kosten:

- Optimierung und Verstärkung bestehender Freileitungen¹⁴² durch Leiterseiltemperaturmonitoring und (in kritischen Abschnitten) Hochtemperaturleiterseile haben sowohl niedrige einzelwirtschaftliche als auch niedrige soziale Kosten und damit bei Weitem die niedrigsten volkswirtschaftlichen Kosten.
- Freileitungen haben neben einzelwirtschaftlichen besonders hohe soziale Kosten; ihre volkswirtschaftlichen Kosten sind also beträchtlich.
- Freileitungen mit Drehstromteilverkabelung haben deutlich höhere einzelwirtschaftliche Kosten, aber im Regelfall deutlich niedrigere soziale Kosten.
- Für eine Vollverkabelung eignen sich besonders gut Gleichstromleitungen (HGÜ). Hierfür sind Umformer zum Drehstromnetz erforderlich, die hohe einzelwirtschaftliche Kosten verursachen. Ihre einzelwirtschaftlichen Kosten sind niedriger als bei Freileitungen mit hohem Anteil von Teilverkabelung.¹⁴³

5.2.2 Bestimmung des optimalen Netzausbaus

Eine simple Optimierung über Faustregeln ist nicht ausreichend. Insbesondere angesichts der am Ende auf die Stromverbraucher überwälzten Netzausbaukosten von mehreren Milliarden Euro pro Jahr ist eine wissenschaftlich begründete Bestimmung des optimalen Netzausbaus erforderlich.

Ein Netzausbau ist dann optimal, wenn sein Grenznutzen, hier also der Nutzen pro Erhöhung des zulässigen Stromtransports, gleich seinen Grenzkosten ist, hier also die Kosten pro Erhöhung des zulässigen Stromtransports. Das Netz muss demnach bis zu dem Punkt umgebaut werden, bei dem der volkswirtschaftliche Nettoertrag, also Nutzen minus Kosten, sein Maximum annimmt.¹⁴⁴

Für die Sicherstellung einer volkswirtschaftlich optimalen Stromversorgung gibt es bei der Optimierung des Netzausbaus zwei ganz unterschiedliche Problemstellungen:

- Veränderung der kostenoptimalen Reihenfolge des Kraftwerkseinsatzes (merit order), falls für den Einsatz eines bestimmten Kraftwerks ein Netzausbau erforderlich ist.

- Abregelung von Kraftwerken zur Reduzierung des Netzausbaus.

In beiden Fällen müssen Stromproduktionskosten und Netzausbaukosten simultan berücksichtigt werden, um eine kostenoptimale Stromversorgung sicherzustellen.

5.3 Optimierung des Netzausbaus durch kostenoptimierten Kraftwerkseinsatz

5.3.1 Niedrige Stromproduktionskosten können hohe Strompreise verursachen

Die derzeitige Vorgehensweise bei der Netzentwicklungsplanung, bei konventionellen Kraftwerken "auf der Stufe der Netzplanung ... Redispatch von Kraftwerken zur Vermeidung von Netzausbaubedarf"¹⁴⁵ in keinem Fall zu berücksichtigen, kann zu einem unnötigen Netzausbau und damit zu unnötigen Kosten für den Stromverbraucher führen.¹⁴⁶ Deshalb muss schon bei der Netzplanung geprüft werden, ob durch Einsatz eines Kraftwerks mit geringeren variablen Stromproduktionskosten auch bei Berücksichtigung von dadurch verursachten Netzausbaukosten die insgesamt kostengünstigere Versorgung der Stromverbraucher erreicht wird.

Für die Optimierung des Netzausbaus sind folgende Fragen zu beantworten:

- Sollen Kraftwerke mit niedrigen variablen Stromproduktionskosten eingesetzt werden, obwohl deren Einsatz einen Netzausbau erfordert?
- Oder sollen besser Kraftwerke mit zwar höheren variablen Kosten eingesetzt werden, die aber keinen Netzausbau erfordern?

Zur Beantwortung dieser Frage müssen die niedrigeren Stromproduktionskosten plus Netzausbaukosten verglichen werden mit den höheren Stromproduktionskosten ohne Netzausbaukosten.

5.3.2 Kostenoptimale Stromversorgung durch kostenoptimierten Netzausbau

Zur Erläuterung der Vorgehensweise möge folgendes Beispiel dienen. Für die Abdeckung eines zusätzlichen Stromverbrauchs in Süddeutschland gebe es zwei Alternativen:

- norddeutsches Kohlekraftwerk oder
- süddeutsches Gaskraftwerk.

Das süddeutsche Gaskraftwerk soll ohne Netzausbau den süddeutschen Strombedarf decken können, hingegen soll für die Abdeckung durch das norddeutsche Kohlekraftwerk ein Netzausbau erforderlich sein.

Für die kostenoptimale Stromversorgung und den dafür erforderlichen Netzausbau müssen dann bestimmt werden:

- **Grenznutzen** des Netzausbaus:
Einsparung an Stromproduktionskosten, weil durch den Netzausbau das norddeutsche Kohlekraftwerk mit niedrigen variablen Stromproduktionskosten eingesetzt werden kann statt des süddeutschen Gaskraftwerks mit hohen variablen Stromproduktionskosten.
- **Grenzkosten** des Netzausbaus:
Kosten des erforderlichen Netzausbaus, um den Strom vom norddeutschen Kohlekraftwerk nach Süddeutschland transportieren zu können.

Nur falls der Grenznutzen des Netzausbaus größer ist als die Grenzkosten, sollte das Netz ausgebaut werden, um so den Einsatz des norddeutschen Kohlekraftwerks statt des süddeutschen Gaskraftwerks zu ermöglichen.

5.4 Optimierung des Netzausbaus durch Spitzenkappung

Im vorherigen Kap. 5.3 wurde erläutert, dass schon bei der Netzplanung geprüft werden muss, ob durch Einsatz eines Kraftwerks mit geringeren variablen Stromproduktionskosten auch bei Berücksichtigung von dadurch verursachten Netzausbaukosten die insgesamt kostengünstigere Versorgung der Stromverbraucher erreicht wird. Im Folgenden geht hingegen um die Frage, wie stark Kraftwerke abgeregelt werden sollen, um den erforderlichen Netzausbau kostenoptimal zu reduzieren und so eine kostenoptimale Stromversorgung sicherzustellen.

Das gesetzliche Gebot der wirtschaftlichen Zumutbarkeit des Netzausbaus¹⁴⁷ bedeutet insbesondere, dass für seltene kurze Spitzen der Stromproduktion kein Netzausbau erfolgen sollte, weil diese Spitzen selbst in ihrer Summe nur äußerst wenig Energie (= Leistung mal Zeit) erbringen.

Die Begrenzung der Stromproduktion muss dadurch eingehalten werden, dass seltene und kurze simultane Leistungsspitzen durch zeitabhängige Drosselung der abgegebenen Leistung so heruntergeregelt werden, wie es ein optimiertes Stromnetz zulässt. Dabei müssen bei der Netzplanung auch Netzstörfälle eingeplant werden.

Andernfalls müsste für den gesicherten Stromtransport auch von Produktionsspitzen der zulässige Stromtransport durch Netzausbau erhöht werden, bis hin zum Neubau von Nord-Süd-Leitungen. Für einen solchen Netzausbau müssten Millionen von Euros investiert werden, um einen Mehrertrag durch erneuerbare Stromspitzen im Wert von nur einigen Tausend Euros zu erzielen. Dies stünde im Widerspruch nicht nur zum gesunden Menschenverstand, sondern auch zu den gesetzlichen Vorgaben zur wirtschaftlichen Zumutbarkeit des Netzausbaus¹⁴⁸.

5.4.1 Wie funktioniert Spitzenkappung?

Abb. 5.2 zeigt die Wirkungsweise der Spitzenkappung bei der Stromproduktion.

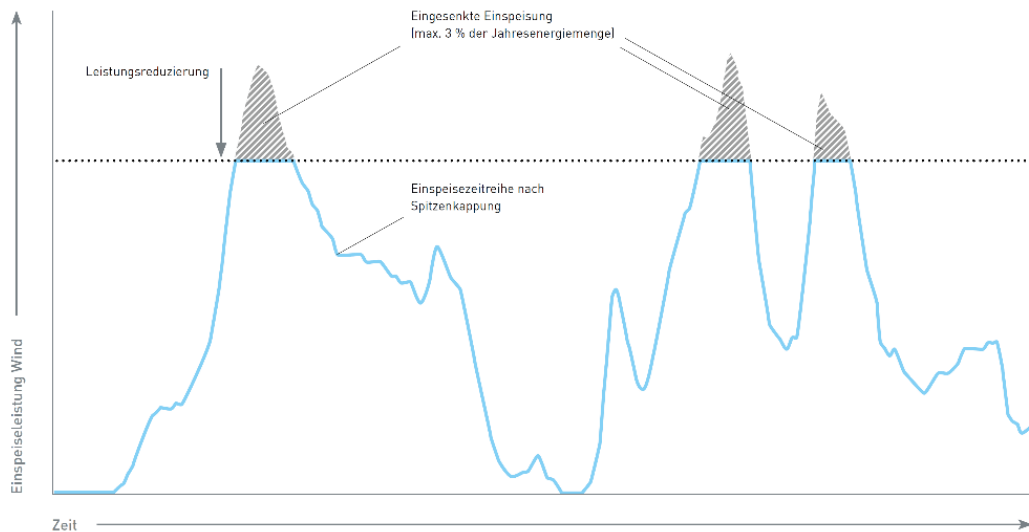
Die grundsätzliche Vorgehensweise zur Optimierung des Netzausbaus kann man sich am Beispiel der Windstromproduktion wie folgt klarmachen¹⁴⁹:

- In einem ersten Schritt werden die Kosten für denjenigen Netzausbau bestimmt, der 100% der installierten Generatorleistung der Windkraftwerke als zulässigen Stromtransport sicherstellt.

- Anschließend wird in kleinen Schritten der geplante Netzausbau reduziert und dabei jeweils einerseits die Einsparung bei den Netzausbaukosten und andererseits die Reduzierung der Vergütungssummen wegen Abregelung der Windkraftwerke bestimmt.
- Solange die Reduzierung der Netzausbaukosten größer ist als die Vergütungssumme für die zusätzlich abgeregelte Windstromproduktion, wird der Netzausbau schrittweise weiter reduziert.

Bei der Optimierung ist zu prüfen, ob die Menge an 'ausgesperrem' Windstrom optimal ist. Überschreiten die hierdurch entgangenen Einspeisevergütungen im mehrjährigen Mittel die Netzausbaukosten, so ist das Netz offensichtlich unzureichend ausgebaut und ein Netzausbau erforderlich.

Abb. 5.2 : Spitzenkappung der Stromproduktion – Schema



Quelle: [NEP 2025/2, Abb. 6, S. 43].

5.4.2 Spitzenkappung bei konventionellen und bei erneuerbaren Kraftwerken erforderlich

Durch das gesetzliche Gebot der wirtschaftlichen Zumutbarkeit wird der Netzausbau auf das volkswirtschaftlich vernünftige Maß beschränkt. Nicht nur im Notfall einer befürchteten Netzüberlastung, sondern schon im Rahmen der Netzausbauplanung muss die mögliche Abregelung von Produktionsspitzen berücksichtigt werden, und zwar sowohl von konventionellen als auch von erneuerbaren Kraftwerken, wobei der Einspeisevorrang der erneuerbaren Stromproduktion beachtet werden muss.

Netze sollten also nicht für Produktionsspitzen ausgebaut werden, wie die Bundesnetzagentur bereits 2012 in einem Grundsatzpapier feststellte: "Der Netzausbau muss sowohl volkswirtschaftlich als auch betriebswirtschaftlich effizient sein. Dies bedeutet, dass die Netze in der Energiezukunft nicht zur Aufnahme von jeder

beliebig angebotenen Strommenge ausgebaut werden sollten"¹⁵⁰. Andernfalls würden die Stromverbraucher, die den Netzausbau letztlich bezahlen müssen, unnötig belastet.

Durch Spitzenkappung kann der Netzausbaubedarf deutlich reduziert werden, allerdings nur, wenn die gekappte Stromproduktion nicht – wie derzeit? – durch Kraftwerke ersetzt wird, für deren Nutzung gegebenenfalls zusätzliche Leitungen erforderlich sind. Im Extremfall würde dann ein Windpark zurückgeregelt werden und die dadurch entfallende Stromproduktion würde durch das Hochfahren eines benachbarten Kohlekraftwerks ausgeglichen werden. Der Netzausbaubedarf würde dann durch Spitzenkappung nur geringfügig vermindert¹⁵¹, im Extremfall sogar erhöht.

(1) Spitzenkappung bei konventionellen Kraftwerken

Für die konventionellen **Kraftwerke** bleibt derzeit bei der Netzausbauplanung eine Abregelung unberücksichtigt. Konventionelle Kraftwerke werden nur bei einem Notfall im tatsächlichen Betrieb gemäß § 13 Abs. 2 EnWG abgeregelt, soweit eine Gefährdung oder Störung des Stromversorgungssystems nicht durch netz- oder marktbezogene Maßnahmen gemäß § 13 Abs. 1 EnWG beseitigt werden kann.

Würde man eine Abregelung von konventionellen Kraftwerken bereits bei der Netzausbauplanung berücksichtigen, könnte man einen beträchtlichen Teil des Netzausbaus einsparen. Für einen bei der Netzplanung berücksichtigten Netzstörfall müssten dann nicht, wie derzeit in der Netzplanung üblich, Reserveleitungen eingeplant werden, sondern man könnte dann eine Abregelung der konventionellen Kraftwerke einplanen. Die derzeitige Vorgehensweise bei der Netzentwicklungsplanung, bei konventionellen Kraftwerken "auf der Stufe der Netzplanung keinen Redispatch von Kraftwerken ... zur Vermeidung von Netzausbaubedarf"¹⁵² zu berücksichtigen, führt also zwingend zu einem unnötigen Leitungsausbau und zu unnötigen Kosten für den Stromverbraucher.¹⁵³

(2) Spitzenkappung bei erneuerbaren Kraftwerken

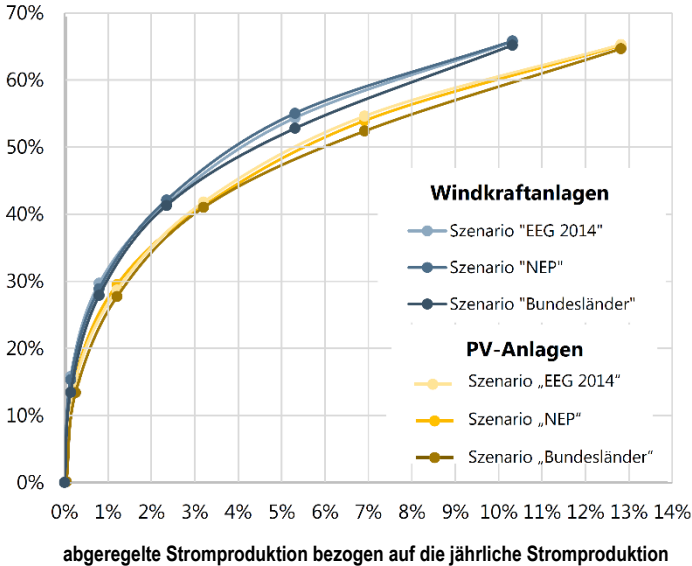
Im Gegensatz zu einer Spitzenkappung bei konventionellen Kraftwerken haben die Übertragungsnetzbetreiber mittlerweile bei erneuerbaren Kraftwerken das Potenzial einer Spitzenkappung für eine Reduzierung des erforderlichen Netzausbaus erkannt.¹⁵⁴

Bereits eine Abregelung von gut 3% der jährlichen Stromproduktion von erneuerbaren Kraftwerken kann den Netzausbaubedarf halbieren, wie Abb. 5.3 zeigt. Schon der Netzentwicklungsplan 2023 bestätigte das große Potenzial der Spitzenkappung für eine Reduzierung des erforderlichen Netzausbaus. Trotzdem wurden weder im Netzentwicklungsplan 2023 noch im Netzentwicklungsplan 2024 die Möglichkeiten der Spitzenkappung von erneuerbaren Kraftwerken berücksichtigt.¹⁵⁵

Die Bundesnetzagentur hat nun endlich für den Netzentwicklungsplan 2025 eine Berücksichtigung der Spitzenkappung schon bei der Netzplanung vorgeschrieben.¹⁵⁶ Allerdings gilt die Spitzenkappung nur für die erneuerbare Stromproduktion, und nur um maximal 3% der jährlichen Stromproduktion. Dabei bleibt die sehr hohe Versorgungssicherheit für den Stromverbraucher erhalten, weil für die abgeregelte Stromproduktion andere Kraftwerke einspringen, um Abschaltungen von Verbrauchern zu verhindern.

Abb. 5.3 : Eingesparter Netzausbau in Abhängigkeit der abgeregelten Stromproduktion

Einsparung Netzausbau [%]



Quelle: [BMWi 2014, Abb. 52, S. 76].

5.4.3 Fallbeispiele für die optimale Spitzenkappung bei Windstrom

Zunächst wird die Bestimmung von **Grenznutzen** und **Grenzkosten** einer Erhöhung des zulässigen Stromtransports erläutert.¹⁵⁷

Bestimmung des Grenznutzens

Die Dauer-Leistung-Kurve einer Gesamtheit von Windkraftwerken stellt die **energetische** Grenznutzen-Leistung-Beziehung dar. Durch die monetäre Bewertung der Stromproduktion mittels der EEG-Vergütung¹⁵⁸ wird sie zur **monetären** Grenznutzen-Leistung-Beziehung und damit zur Grenznutzen-Kurve.

Bestimmung der Grenzkosten

Die jährlichen **einzelwirtschaftlichen Kosten** pro zusätzlich übertragbare Leistung im Netz sind bei gegebener technischer Ausführung etwa proportional zur Länge der Strecke.¹⁵⁹

Zu den genannten einzelwirtschaftlichen Kosten treten die **sozialen Kosten** (v.a. Umweltkosten) der jeweiligen Netzausbaumaßnahmen hinzu.¹⁶⁰ Die Summe aus einzelwirtschaftlichen und sozialen Kosten ergibt die volkswirtschaftlichen Kosten des Netzausbaus.

Daraus ergeben sich jeweils folgende Ergebnisse:

- Richtwerte für den volkswirtschaftlich optimalen Netzausbau, zu dem der Netzbetreiber in der betroffenen Region gesetzlich verpflichtet ist.

- Abschätzungen für die auch nach optimiertem Netzausbau noch zumutbaren gelegentlichen Leistungsbeschränkungen, die – zeitlich variabel und nachfrageabhängig – erforderlich bleiben, um Überinvestitionen im Netzausbau zu vermeiden.

Bei Stromüberschuss ist eine Abregelung von Windkraftwerken erforderlich, was zu niedrigen Börsenstrompreisen führt. Eine Bewertung der Windstromproduktion nicht mit EEG-Vergütungen, sondern mit Börsenstrompreisen, würde deshalb den Wert der abgeregelten Stromproduktion deutlich reduzieren und damit auch den Umfang des wirtschaftlich zumutbaren Netzausbaus noch weiter absenken.¹⁶¹

Bei einer einheitlichen EEG-Vergütung für Windstrom sowohl bei Stromüberschuss als auch bei Stromdefizit werden die Kraftwerksbetreiber verleitet, bei gegebener Rotorgröße übergroße Generatoren zu installieren. Mit geringen Mehrkosten können sie so eine höhere Stromproduktion erreichen, für die sie die volle EEG-Vergütung erhalten, obwohl der zusätzlich erzeugte Strom meist in Zeiten von Stromüberschuss anfällt und deshalb einen geringen volkswirtschaftlichen Wert hat. Dieser Fehlanreiz wird noch verstärkt, weil die Betreiber der Windkraftwerke für die Abregelung von Windstromspitzen entschädigt werden und sie zudem nicht die Kosten des durch übergroße Generatoren bedingten Netzausbaus tragen müssen.

Die Bestimmung des optimalen Netzausbaus wird im Folgenden für drei Fallbeispiele erläutert:

- Netzanschluss eines Onshore-Windparks mit 110-kV-Drehstromleitungen.
- Netzanschluss eines Offshore-Windparks mit 320-kV-Gleichstromleitungen.
- Ferntransport von Windstrom mit 380-kV-Drehstromleitungen.

(1) Netzanschluss eines Onshore-Windparks mit 110-kV-Drehstromleitungen

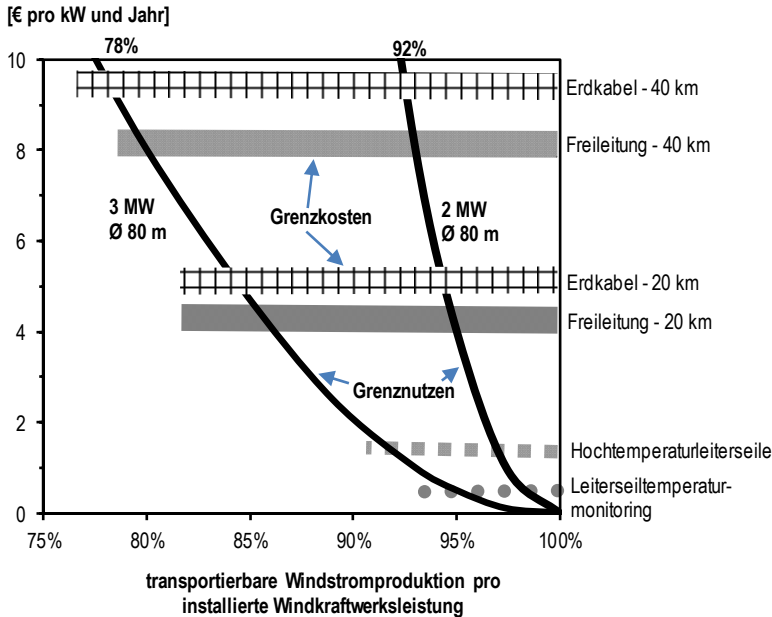
Abb. 5.4 zeigt die Optimierung des 110-kV-Netzanschlusses eines Windparks in windstarker Küstenlage für unterschiedliche technische Möglichkeiten. Dabei wird beispielhaft von einem Park von Windkraftanlagen mit Rotordurchmessern von 80 m und Generatorgrößen von alternativ 2 MW und 3 MW ausgegangen.

Bei einer Generatorgröße von 2 MW liegen die Schnittpunkte, die die optimale Spitzenkappung anzeigen, bei 92% der Nennleistung des Windparks, falls ein Netzanschluss per Erdkabel für 40 km Länge erforderlich ist. Für den Netzausbau muss also von einer Spitzenkappung von 8% der installierten Leistung bei einer Netzüberlastung ausgegangen werden. Für jedes Windkraftwerk wird also das Netz nicht für die installierte Leistung von 2 MW ausgebaut, sondern durchschnittlich nur für 1,84 MW (= 92% * 2 MW). Dieser Wert gilt nur für windstarke Küstenlagen. Für windschwächere und topografisch stärker gegliederte Gebiete, z.B. weit südlich der Küste oder im Mittelgebirge, resultiert ein Netzausbaubedarf von deutlich unter 90%¹⁶² der im betrachteten Gebiet insgesamt installierten Windleistung.

Wird bei 80 m Rotordurchmesser die Generatorgröße von 2 MW auf 3 MW erhöht, muss pro Windkraftwerk eine Netzanschlussleistung von 2,34 MW (= 78% * 3 MW) vorgesehen werden, weil die optimale Spitzenkappung von 8% auf 22% (= 100% - 78%) steigt.

Bei einer Erhöhung der installierten Leistung von 2 MW auf 3 MW, also um 1 MW, steigt der erforderliche Netzausbau nur um 0,5 MW (von 1,84 MW auf 2,34 MW).

Abb. 5.4 : Optimierung des 110-kV-Netzanschlusses eines Onshore-Windparks



Hinweis:

Die volkswirtschaftlichen Kosten pro zusätzlich transportierbare Leistung sind im untersuchten Bereich weitgehend unabhängig von der Grenzleistung der Leitung. Deshalb sind die Grenzkosten-Kurven in guter Näherung horizontale Geraden in einer Höhe, die den Kosten der jeweiligen Netzausbaumaßnahme entspricht.

Quelle: [Jarass/Obermair 2012, Abb. 6.5, S. 158], Flächenleistung 400 W/m^2 (z.B. 2 MW bei $\varnothing = 80 \text{ m}$). Abschätzung unter zusätzlicher Berücksichtigung der wechselseitigen Abschattung und der technischen Nichtverfügbarkeit der Anlagen sowie Bewertung der Windstromproduktion mit $0,1 \text{ €/kWh}$.

Die Jahresstromproduktion erhöht sich zwar durch die höhere Generatorleistung, die Mehrproduktion fällt aber ausschließlich in Starkwindperioden an. Eine derartige Erhöhung der installierten Leistung bei gegebenem Rotordurchmesser erhöht also den Netzausbau unnötig. Bei gegebenem Rotordurchmesser kleinere Generatoren sowie zudem größere Turmhöhen zu bauen, würde hingegen die Windstromproduktion vergleichmäßigen und damit den erforderlichen Netzausbaubedarf reduzieren.

(2) Netzanschluss eines Offshore-Windparks mit 320-kV-Gleichstromleitungen

Offshore-Windstrom muss über Entfernungen von 100 km und mehr zuerst am Meeresgrund bis zur Küste, dann weiter an Land bis zur Übergabe an einen starken Netzknoten mit Leistungen von mehreren GW transportiert werden.

Als technische Alternative für den Anschluss der großen neuen Offshore-Windparks bis zur Küste und dann weiter bis zum 380-kV-Höchstspannungsnetz kommt nur ein Neubau mit Seekabeln in Frage, für längere Strecken zwingend in Gleichstromausführung, ebenso die Fortführung an Land als Gleichstromerdkabel. Hierfür werden 320-kV-Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitungen (HGÜ) verwendet. Typische Leitungslängen sind 100 km bis 200 km.

Der Offshore-Netzanschluss besteht aus vom öffentlichen Netz getrennten Windstrom-Transportleitungen. Sie werden deshalb nicht (n-1)-gesichert als Doppelleitungen ausgeführt, sondern nur als Einfachleitungen, was die Kosten fast halbiert. Bei einem der sehr seltenen Kabelschäden¹⁶³

sind lange Reparaturdauern zu erwarten. Falls mittelfristig jeder Netzknoten im Meer ('Steckdose') mit mehreren Kabelsystemen ans Festland angeschlossen wird, könnte damit annähernd die Versorgungssicherheit eines vermaschten Systems erreicht werden.

Die **Kosten des Offshore-Netzanschlusses** hängen stark vom Abstand zur Küste und der entsprechend erforderlichen Leitungslänge ab. Zudem führen größere Verlegungstiefen und ein schwieriger Untergrund, z.B. in der Nordsee häufig anzutreffende Treibsände, zu Kostenerhöhungen. Die tatsächliche Kostenentwicklung wird auch stark von Art und Umfang neuer Kabel- und Verlegetechniken abhängen.

Eine optimale Spitzenkappung von Offshore-Windkraftwerken liegt im Bereich von 15% bis 20%¹⁶⁴ der insgesamt installierten Generatorleistung der Offshore-Windkraftwerke. Nach einigen Jahren Betriebserfahrung mit den Anlagen wird man sehen, ob der Wert eher etwas größer oder etwas kleiner gewählt werden sollte.

Der Offshore-Windstrom kann nur zum Teil in Norddeutschland verbraucht werden, der Rest muss zukünftig zu den weit entfernt liegenden Verbrauchsschwerpunkten in West- und Süddeutschland sowie zu Speicherkraftwerken nach Norwegen oder in die Alpen transportiert werden. Bei anteiliger Berücksichtigung dieser Transportkosten, die im folgenden Fallbeispiel dargestellt werden, steigt die optimale Spitzenkappung auf deutlich über 20% der insgesamt installierten Generatorleistung aller Offshore-Windparks.

(3) Ferntransport von Windstrom mit 380-kV-Drehstromleitungen

Der Windstrom muss aus den Küstenregionen zu den Verbrauchsschwerpunkten und Speicherkraftwerken im Westen und Süden Deutschlands transportiert werden, mit typischen Leitungslängen von 200 km bis weit über 500 km.

Technische Alternativen für den Netzausbau sind je nach Bedarf:

- Leitungsoptimierung, z.B. mittels Leiterseiltemperaturmonitoring¹⁶⁵,
- Verstärkung bestehender Leitungen, z.B. mittels Hochtemperaturleiterseilen¹⁶⁶,
- Leitungsneubau als Freileitung in Dreh- oder Gleichstromtechnik, bei Querung besonders sensibler Landschaft oder Annäherung an Siedlungen als Teilverkabelung bzw. auf ganzer Länge als Gleichstromerkabel¹⁶⁷.

Der wirtschaftlich zumutbare Netzausbau im Bereich der 380-kV-Höchstspannungsfernleitungen ist abhängig von der erforderlichen Leitungslänge und der verwendeten Leitungsart. Er liegt z.B. für den Windstromtransport von Ostdeutschland nach Süddeutschland bei weniger als 65%¹⁶⁸ der installierten Leistung derjenigen Windkraftwerke, deren Stromproduktion nach Süddeutschland transportiert werden soll. Die optimale Netzausbauleistung ist mit unter 65% der insgesamt installierten Windkraftwerksleistung deshalb so niedrig, weil sich Produktionsspitzen einzelner ostdeutscher Windkraftwerke wegen der großen räumlichen Ausdehnung Ostdeutschlands und seiner topologisch starken Gliederung häufig ausgleichen. Dies steht im Gegensatz von räumlich konzentrierten Netzanschlüssen eines Windkraftwerks onshore oder offshore, wo die optimale Netzausbauleistung deutlich über 80% liegt.

Die Begrenzung bedeutet nicht, dass jedes einzelne Windkraftwerk auf 65% seiner jeweils installierten Leistung reduziert wird. Nur bei momentan sehr hoher simultaner Windstromproduktion

in größeren Gebieten der Regelzone, was im Mittel sehr selten und nur für kurze Zeitabschnitte vorkommt, kann die zur 380-kV-Ebene durchzuleitende Windkraftwerksleistung die Grenzlast des Netzes überschreiten. In diesem Fall muss die Windstromproduktion um bis zu 35% der insgesamt installierten Windkraftwerksleistung abgeregelt werden.

Eine statistische Analyse der erneuerbaren Stromproduktion in der 50Hertz-Regelzone hat beispielsweise gezeigt, dass bei optimiertem Netzausbau durch das dann erforderliche Abregeln seltener Leistungsspitzen weniger als 1% der möglichen jährlichen Windstromproduktion abgeregelt wird.¹⁶⁹ Wird die Leitungsbelastbarkeit durch Leiterseiltemperaturmonitoring der 380-kV-Leitungen gemessen und variabel geregelt, so treten solche Beschränkungen der Stromproduktion noch seltener auf und die insgesamt abgeregelt Stromproduktion wird noch weiter gesenkt.

Differenzen zwischen notwendigem und zulässigem Stromtransport müssen unverzüglich ausgeglichen werden. Im folgenden Kapitel werden Maßnahmen für diesen Ausgleich dargestellt und bewertet.