
Prof. Dr. Lorenz JARASS, M.S. (Stanford University, USA)

RheinMain University Wiesbaden

c/o Dudenstr. 33, D - 65193 Wiesbaden, T. +49(611)1885407

mail@JARASS.com, <http://www.JARASS.com>

Forschungskolloquium

des Energiewirtschaftlichen Instituts an der Universität zu Köln

Wirtschaftlich zumutbarer Netzausbau für Windenergieanlagen

Inhaltsverzeichnis

- 1 **Wirtschaftliche Zumutbarkeit als Begrenzung für Netzausbau und für Windenergieeinspeisung**
- 2 **Bestimmung des wirtschaftlich zumutbaren Netzausbaus**
- 3 **Fallbeispiele für die Netzanbindung von Windparks**
- 4 **Zusammenfassung**

Die folgenden Ausführungen basieren auf

Jarass/Obermair/Voigt:

Windenergie – Zuverlässige Integration in die Energieversorgung

Springer-Verlag, 2., vollst. neu bearb. Aufl., Juni 2009

1 Wirtschaftliche Zumutbarkeit als Begrenzung für Netzausbau und für Windenergieeinspeisung

1.1 Problemstellung

Nachhaltige Auseinandersetzungen bezüglich Umfang und Art der Erhöhung der Übertragungsleistung der Stromnetze:

- Betreiber von Windparks klagen gegen Regionalnetzbetreiber wegen unzureichender Einspeisemöglichkeiten und daraus resultierender zeitweiser Abschaltungen ('Einspeisemanagement').
- Gebietskörperschaften, wie Städte und Gemeinden, klagen gegen ihre Landesverwaltungen, sofern diese den Verbundnetzbetreibern landschaftsbeeinträchtigende **Freileitungs**neubaustrecken genehmigen wollen.
- Ein Teil der Leitungen wird als nicht zwingend erforderlich, jedenfalls aber nicht als windbedingt angesehen, ihr Bau wird auch deshalb nur als Erdkabelausführung akzeptiert.

Bei der Netzanbindung von Offshore-Windkraftwerken werden diese Probleme noch verschärft: Während onshore ein fehlender Netzausbau nur zu relativ seltenen Abschaltungen führt, bedeutet eine fehlende Netzanbindung offshore, dass überhaupt kein Strom eingespeist werden kann.

Deshalb ist ein transparentes, rationales Verfahren erforderlich

- zur Bestimmung der angemessenen technischen Umsetzung der Erhöhung der Übertragungsleistung und
- zur Einengung des Bandes zwischen ´zu wenig´ und ´zu viel´ bei der windenergiebedingten Verstärkung des Stromnetzes

auf der Grundlage einer volkswirtschaftlichen Optimierung.

1.2 Technische Optimierung der Erhöhung der Übertragungsleistung

Erhöhung der Übertragungsleistung in drei aufeinander folgenden Stufen von jeweils höherem Kostenaufwand:

- Netzoptimierung des bestehenden Systems, z.B. durch Erhöhung der verwendeten Spannung, durch Regelung des Lastflusses mittels Querreger oder durch Nutzung vorübergehend vorhandener Netzreserven mittels Leitungsmonitoring.
- Netzverstärkung von bestehenden Leitungen, insbesondere bei Freileitungen, indem z.B. herkömmliche Leiterseile durch Hochtemperaturleiterseile ersetzt werden, am besten in Kombination mit Leitungsmonitoring.

Schließlich, falls Netzoptimierung und Netzverstärkung nicht ausreichen:

- Neubau einer kompletten Stromleitung; auf 110-kV-Niveau im Regelfall als Erdkabel kostengünstig ausführbar zur Vermeidung langer Gerichtsverfahren mit den Anliegern von geplanten Freileitungstrassen; auch für den Neubau von 380-kV-Trassen gibt es ab 2009 Vorgaben zur Teilverkabelung.

1.3 Wirtschaftliche Zumutbarkeit als Verhältnismäßigkeit von volkswirtschaftlichen Nutzen und Kosten

„Netzbetreiber sind auf Verlangen der Einspeisewilligen verpflichtet, unverzüglich ihre Netze entsprechend dem Stand der Technik zu optimieren, zu verstärken und auszubauen.“ [EEG 2008, § 9 (1)]

Einschränkung [EEG 2008, § 9 (3)]: „Der Netzbetreiber ist **nicht** zur Optimierung, zur Verstärkung und zum Ausbau seines Netzes **verpflichtet, soweit dies wirtschaftlich unzumutbar ist.**

Diese Einschränkung der Verpflichtung der Netzbetreiber wird schon im Energiewirtschaftsgesetz betont [EnWG 2008, § 11 (1), Satz 1]: „Betreiber von Energieversorgungsnetzen sind **verpflichtet**, ein sicheres, zuverlässiges und leistungsfähiges Energieversorgungsnetz diskriminierungsfrei zu betreiben, zu warten und bedarfsgerecht auszubauen, **soweit es wirtschaftlich zumutbar ist.**“

Es existiert also sowohl im Erneuerbare-Energien-Gesetz als auch im Energiewirtschaftsgesetz die eindeutige Vorschrift, dass zur Übertragung erneuerbarer Energien der Netzbetreiber zum unverzüglichen Ausbau verpflichtet ist, soweit dieser Ausbau (volks)wirtschaftlich zumutbar ist.

Diese Anweisung zu einer gewissen Beschränkung der Höhe des Netzausbaus drückt eigentlich nur die wirtschaftliche Selbstverständlichkeit aus, dass für sehr seltene kurze Spitzen der *Leistung* der möglichen Erzeugung, die selbst in Ihrer Summe nur äußerst wenig Energie (= Leistung mal Zeit) erbringen, keine zusätzliche Übertragungskapazität geschaffen werden muss.

Als unvermeidliche Folge dieses gesetzlichen Gebots der Wirtschaftlichkeit muss die Einspeisung bei solchen Spitzen kurzzeitig heruntergeregelt werden, falls die Leitungen nicht ausreichen. Andernfalls würden die Stromverbraucher, die die Erhöhung der Übertragungskapazität letztlich bezahlen müssen, unnötig belastet.

Dies steht im Gegensatz zum Netzausbau für die Versorgung von Verbrauchern, wo auch sehr seltene Nachfragespitzen durch das Netz abgedeckt werden müssen, um Abschaltungen von Verbrauchern zu verhindern.

2 Bestimmung des wirtschaftlich zumutbaren Netzausbaus

Ob eine Maßnahme zur Netzanbindung von Offshore-Windenergieanlagen wirtschaftlich zumutbar ist und insbesondere **wie weit**, d.h. bei welcher Höhe, bei welchen volkswirtschaftlichen Kosten und bei welchem finanziellen Risiko die wirtschaftliche Unzumutbarkeit einsetzt, kann allerdings nur beurteilt werden, wenn ein objektiver quantitativer Maßstab für die Beurteilung der wirtschaftlichen Zumutbarkeit nach den allgemeinen Regeln der Ökonomie angewandt wird. Davon handeln die folgenden Abschnitte.

2.1 Faustregeln für wirtschaftliche Zumutbarkeit

Der Gesetzgeber hat leider keine Regelungen zur operationalen Umsetzung des Begriffs der wirtschaftlichen Zumutbarkeit gemacht, weder in [EEG 2008] selbst noch insbesondere in [EEG 2008 § 64, Verordnungsermächtigung] noch in [EnLAG 2009].

Allerdings nennt die offizielle Gesetzesbegründung zum EEG 2004 [EEG-Begründung 2004] zwei verschiedene Faustregeln, die der Beurteilung der wirtschaftlichen Zumutbarkeit von windbedingten Netzausbaumaßnahmen dienen sollen:

2.1.1 Faustregel 1: Grenze für wirtschaftliche Unzumutbarkeit

Zumutbarkeit des Netzausbaus findet ihre Grenze dort, wo die Vergütungssummen nicht deutlich größer sind als die Netzausbaukosten.

Vergütungssummen

Ein Offshore-Windpark hat rund 4.000 Volllaststunden pro Jahr. Die Vergütung wird mit der durchschnittlichen EEG-Einspeisevergütung, hier pauschal mit 0,1 €/kWh angesetzt:

Vergütungssumme pro kW Nennleistung =
4.000 Stunden pro Jahr/a * 20 Jahre * 0,1 €/kWh = 8.000 €/kW.

Kosten der Netzanbindung von Offshore-Windkraftwerken

Investitionskosten in der ersten Phase bei knapp 1.100 €/kW, ab 2011 nur noch ca. 800 €/kW.

Anwendung von Faustregel 1

Die Vergütungssumme übersteigt demnach die Kosten der Netzanbindung (‘Netzausbau’) mindestens um das Siebenfache. Damit ist die **Grenze für wirtschaftliche Unzumutbarkeit sicher nicht erreicht.**

Aber: Müssten nicht auch die zusätzlich erforderlichen Leitungsverbindungen nach Süddeutschland und nach Norwegen mitberücksichtigt werden?

2.1.2 Faustregel 2: Geeigneter Anhaltspunkt für wirtschaftliche Zumutbarkeit

Verhältnismäßig und damit zumutbar im engeren Sinne ist der Ausbau daher insbesondere dann, wenn die Kosten des Ausbaus 25% der Kosten der Errichtung der Stromerzeugungsanlage nicht überschreiten.

Offshore-Windkraftwerke

Investitionskosten für die Netzanbindung von rund 1.000 €/kW betragen rund ein Drittel der geschätzten Investitionskosten der geplanten Offshore-Windkraftwerke von etwa 3.000 €/kW.

Mit einem Drittel sind die Kosten der Netzanbindung deutlich höher als die genannten 25% der Investitionskosten der Windkraftwerke.

Es muss eine entsprechende Entscheidung der Bundesnetzagentur über das hierfür erforderliche Investitionsbudget vorliegen, bevor der Bau weiterer Offshore-Netzanbindungen vorangetrieben werden kann, da die Bundesnetzagentur wegen der Überwälzung der Netzkosten auf die Stromverbraucher die Kosteneffizienz einzelner Netzausbaumaßnahmen zu prüfen hat, die in diesem Fall unter Berufung auf das 25%-Kriterium bestritten werden könnte.

Siehe hierzu auch Kap. 4 dieses Vortrags.

2.2 Objektive Bestimmung des wirtschaftlich zumutbaren Netzausbaus

Bei den Faustregeln werden nur der **Gesamtnutzen** und die **Gesamtkosten** miteinander verglichen.

Offen bleibt die Frage, bis zu welcher Grenzleistung in diesen Fällen das Netz ausgebaut werden soll, sodass das Kosten-Nutzen-Optimum erreicht wird. Diese Frage lässt sich nur anhand des Vergleichs von Grenznutzen und Grenzkosten beantworten.

Das Optimum der Höhe einer Investition ergibt sich nämlich dort, wo der **Grenznutzen** einer Netzanbindung ihren **Grenzkosten** gleichkommt (‘Pareto-Optimum’).

Wichtig: Als Nebenbedingung muss **zugleich** gelten, dass der volkswirtschaftliche Gesamtnutzen des Netzausbaus bis zu diesem Optimum größer ist als seine Gesamtkosten, da sonst ganz offensichtlich die Maßnahme für die Gesamtgesellschaft mehr Kosten als Nutzen brächte.

2.2.1 Grenznutzen und Grenzkosten

Man geht gedanklich im ersten Schritt von einem Netzausbau in Höhe von 100% der installierten Leistung der Windenergieanlagen aus, und überlegt dann, wie viel Windenergie und damit Vergütungssummen ausgesperrt werden durch eine Verringerung des Netzausbaus. Sind die ausgesperrten Vergütungssummen kleiner als die Verringerung der Netzausbaukosten, so verringert man den Netzausbau, weil so volkswirtschaftlich Kosten verringert werden und ein entsprechender Netzausbau wirtschaftlich nicht zumutbar wäre.

Das Optimum ist erreicht, wenn der

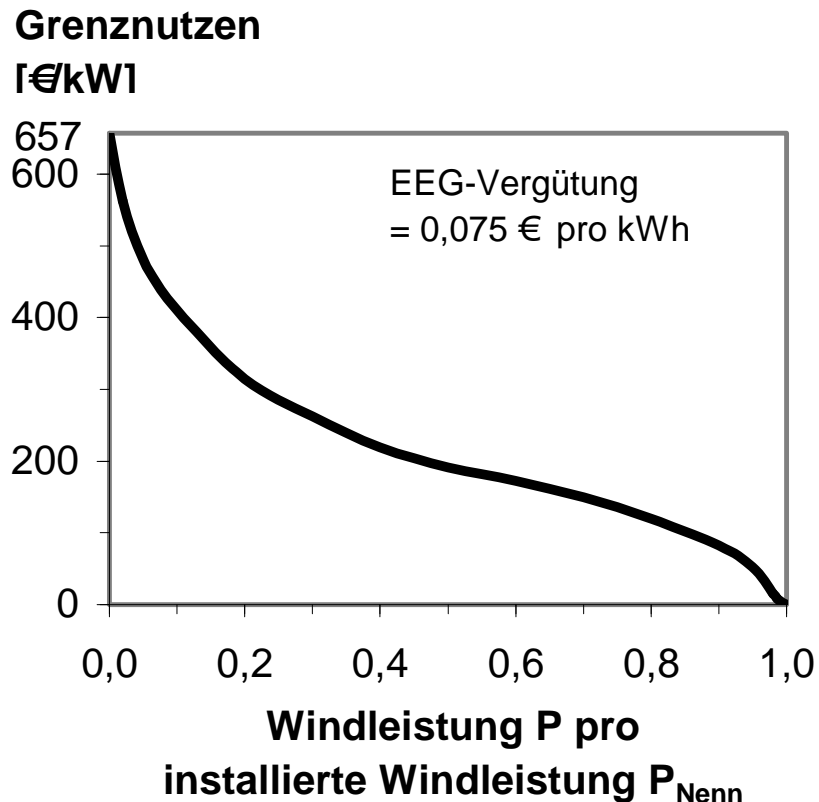
- **Grenznutzen:** **zusätzlicher** volkswirtschaftlicher Nutzen der zusätzlich möglichen Windenergieeinspeisung
gleich ist den
- **Grenzkosten:** **zusätzliche** volkswirtschaftliche Kosten für die zusätzlich zu erstellende Übertragungsleistung des Netzes.

Wirtschaftlich zumutbar ist der Ausbau bis zu diesem Optimum aber nur, wenn der Gesamtnutzen deutlich größer ist als die Gesamtkosten für Netzausbau und Errichtung der Windkraftwerke.

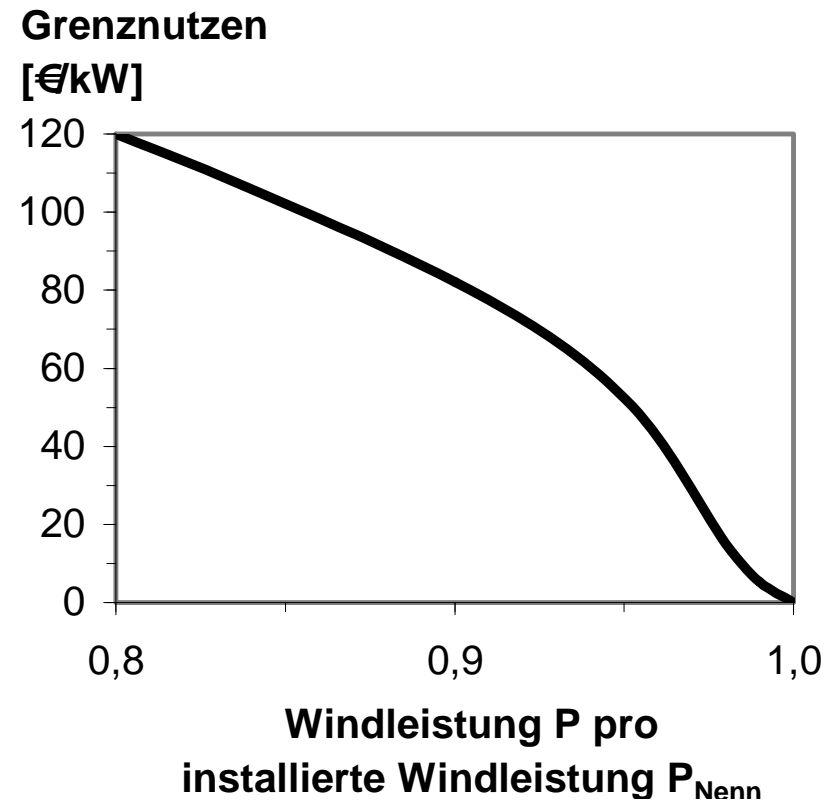
Eine typische Grenznutzen-Leistung-Kurve für einen sehr windgünstigen Küstenstandort zeigen die Abb. 2.1a und 2.1b.

Abbildung 2.1 : Bestimmung des wirtschaftlich zumutbaren Netzausbaus

a) Grenznutzen-Leistung-Kurve

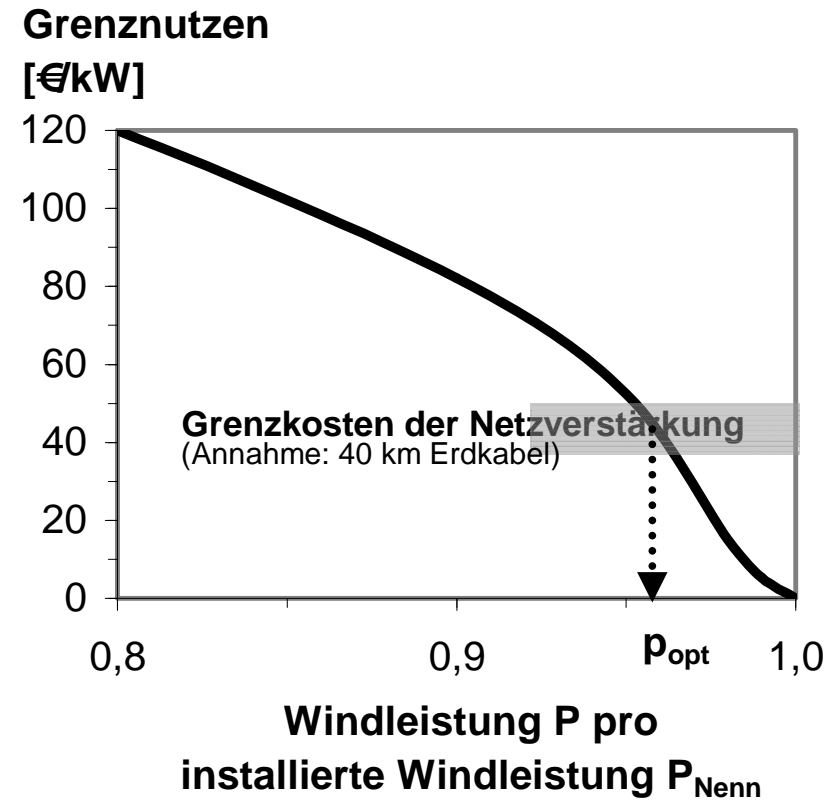


b) Ausschnittsvergrößerung aus a)



2.2.2 Wirtschaftliche Optimierung der Erhöhung der Übertragungsleistung

In Abbildung 2.1c werden nun Kurven für Grenznutzen und Grenzkosten eingezeichnet und so der zusätzliche Nutzen der Windenergieeinspeisung mit den zusätzlichen Kosten einer Netzverstärkung verglichen. Die Schnittmenge der beiden Kurven gibt eine Näherung für das volkswirtschaftliche Optimum des Netzausbaus an.

Abbildung 2.1 : Bestimmung des wirtschaftlich zumutbaren Netzausbaus**c) Optimierung: Schnittpunkt von Grenznutzen und Grenzkosten**

Ergebnis: Optimal und zugleich wirtschaftlich zumutbar ist ein Netzausbau bis zu der Höhe $p = p_{\text{opt}}$, die durch den Schnittpunkt von Grenznutzenkurve und Grenzkostenkurve gegeben ist. Zudem muss der Gesamtnutzen, gegeben durch die Fläche unter der Grenznutzenkurve bis zu p_{opt} , größer sein als die Gesamtkosten.

Für die der Abb. 2.1 zugrunde liegenden Windenergieanlagen ist demnach eine Netzverstärkung von bis zu gut 95% der insgesamt installierten Windleistung optimal, auch wenn die Verstärkung mit einem Zweisystem-Erdkabel über 40 km vorgenommen werden muss.

Der Gesamtnutzen, also die Fläche der Grenznutzenkurve bis $p = p_{\text{opt}}$ ergibt gut 200 €/kW jährlich, die Gesamtkosten sind annähernd gleich den Durchschnittskosten von 40 €/kW, und diese sind wiederum etwa so hoch wie die Grenzkosten. Damit ist der Gesamtnutzen deutlich größer als die Gesamtkosten, der Ausbau ist also wirtschaftlich zumutbar.

3 Fallbeispiele für die Netzanbindung von Windparks

Die Netzanbindung von Windenergie kann in drei verschiedenen Standardfälle unterschieden werden:

(1) Anbindung von Onshore-Windparks

Zusätzliche Einspeisung durch neue sowie durch Repowering vergrößerte Onshore-Windparks. Anbindung meist durch 110-kV-Hochspannungsleitungen.

(2) Anbindung von Offshore-Windparks

Unterseeische Übertragung und an Land möglichst küstennahe Einspeisung in das Höchstspannungsnetz. Anbindung im ersten Schritt durch 145-kV-Gleichstrom-Seekabel, später über 300 kV.

(3) Nord-Süd-Übertragung

Massiv erhöhter Fernübertragungsbedarf im Verbundnetz von den Schwerpunkten der Erzeugung, die an und vor den Küsten liegen, zu den Verbrauchsschwerpunkten vorwiegend im Westen und Süden Deutschlands und zu Speicherkraftwerken in den Mittelgebirgen und in den Alpen, sowie in Norwegen und Schweden. An Land meist durch 380-kV-Höchstspannungsleitungen oder als Gleichspannungserdkabel, auf See als Gleichspannungsseekabel.

3.1 Netzanbindung von Onshore-Windparks

110-kV-Anbindung von Onshore-Windparks an einen starken Übergabepunkt (meist 380-kV-Höchstspannungsnetz):

Als technische Alternative kommt je nach Bedarf eine Verstärkung bestehender regionaler Leitungen mit Hochtemperaturseilen und Leitungsmonitoring oder ein Neubau als Freileitung oder als Erdkabel in Frage; typische Leitungslängen sind 20 km bis 40 km.

Der wirtschaftlich zumutbare Netzausbau liegt im Bereich von 90% bis 95% der Nennleistung des anzuschließenden Windparks. Für windschwächere und topografisch stärker gegliederte Gebiete, z.B. weit südlich der Küste oder im Mittelgebirge, resultiert ein Ausbaubedarf des Netzes von deutlich unter 90% der im betrachteten Gebiet insgesamt installierten Windleistung.

3.2 Netzanbindung von Offshore-Windparks

Als technische Alternative kommt nur ein Neubau mit Seekabeln in Frage, für längere Strecken zwingend in Gleichstromausführung, ebenso die Fortführung an Land als Gleichstrom-Erdkabel; typische Leitungslängen sind 100 km bis 200 km.

Es ist bei allen zukünftigen Offshore-Anbindungen zu prüfen, inwieweit nach einer geeigneten Bündelung die Weiterführung per Gleichstrom nach Süden sinnvoll erscheint.

Die Offshore-Netzanbindung besteht aus vom öffentlichen Netz vollständig getrennten reinen Windenergie-**Entsorgungsleitungen**. Sie werden deshalb nicht (n-1)-gesichert als Doppelleitungen, sondern nur als Einfachleitungen ausgeführt mit etwa den halben Kosten von zwei Systemen.

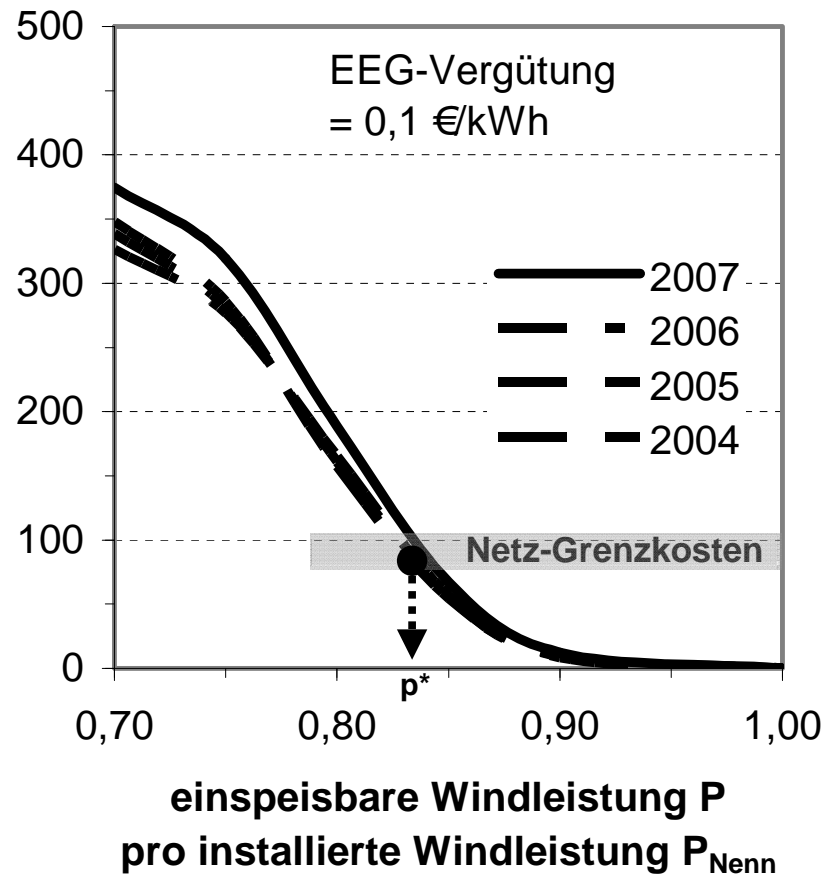
Abb. 3.1 zeigt die resultierende Grenznutzen-Leistung-Kurve für die betrachteten vier Jahre 2004 bis 2007 für einen 400-MW-Windpark (40 Windenergieanlagen Repower-126m/5MW, Abstand 7 Rotordurchmesser) unter Berücksichtigung der technischen Verfügbarkeit.

Die Kosten pro Leistungserhöhung der Netzanbindung betragen derzeit etwa 1.100 €/kW. Legt man die Investitionskosten auf jährliche Zahlungen für Zins und Tilgung um (‘Annuisierung’), und berücksichtigt man Betriebs- und Wartungskosten, so resultieren pro Jahr Kosten in Höhe von etwa 10% der Investitionskosten, also etwa 110 €/kW, zukünftig vielleicht nur noch 80 €/kW.

In Abb. 3.1 sind die jährlichen Netzgrenzkosten als horizontales Band von rechts her im Bereich von 80 bis 110 €/kW eingezeichnet.

Abbildung 3.1 : Wirtschaftlich zumutbare Netzanbindung für einen Windpark am Offshore-Standort FINO1 nördlich von Borkum

Jährlicher **Grenznutzen**: Vergütungssumme pro Erhöhung der einspeisbaren Windleistung P
[€/kW]



Wie in Abb. 3.1 dargestellt, liegt unter den zugrunde gelegten Annahmen die wirtschaftlich zumutbare Grenzleistung der Netzanbindung im Bereich von 80% bis 85% der insgesamt installierten Generatorleistung der Offshore-Windenergieanlagen. Nach einigen Jahren Betriebserfahrung mit den Anlagen wird man sehen, ob der Wert eher etwas größer oder etwas kleiner gewählt werden sollte.

Eine Bewertung der Windenergie nicht mit EEG-Einpeisetarifen, sondern zu Börsenpreisen würde den Wert der Windenergie gerade zu Starkwindzeiten und damit auch den wirtschaftlich zumutbaren Netzausbau deutlich verringern.

Die Offshore-Windenergie kann nicht in Norddeutschland verbraucht werden, sondern muss häufig zu den weit entfernt liegenden Verbrauchsschwerpunkten in West- und Süddeutschland übertragen werden. Bei anteiliger Berücksichtigung dieser Übertragungskosten, die im folgenden Fallbeispiel 3 dargestellt werden, sinkt der wirtschaftlich zumutbare Netzausbau auf **weit** unter 80% der insgesamt installierten Generatorleistung aller Offshore-Windparks.

3.3 Netzverstärkung von Höchstspannungsfernleitungen

Übertragung von Windenergie aus den Küstenregionen zu den Verbrauchsschwerpunkten und Speicherkraftwerken im Westen und Süden. Technische Alternativen sind je nach Bedarf eine Verstärkung bestehender Leitungen mit Hochtemperaturseilen und Leitungsmonitoring oder ein Leitungsneubau als Freileitung oder - zum Schutz der Landschaft - auf ganzer Länge Gleichstromkabel.

Der wirtschaftlich zumutbare Netzausbau liegt im Bereich von 65% und weniger der Nennleistung des anzuschließenden Windparks. Die Begrenzung bedeutet nicht, dass jede einzelne Windenergieanlage auf z.B. 65% ihrer individuellen installierten Leistung reduziert wird. Nur bei momentan sehr hohem simultanen Windangebot in größeren Gebieten der Regelzone, das im Mittel sehr selten und nur für kurze Zeitabschnitte vorkommt, kann die zur 380-kV-Ebene durchgeleitete Windleistung die Grenzlast des Netzes von z.B. 65% der installierten Gesamtleistung der Windgeneratoren überschreiten.

Nur während dieser seltenen und meist kurzen Perioden müssen die Windenergieanlagen soweit heruntergeregelt werden, dass die momentan zulässige Belastbarkeit des Netzes nicht überschritten wird. Wird diese Belastbarkeit durch Temperaturmonitoring der 380-kV-Leitungen gemessen und variabel geregelt, so treten solche Beschränkungen der Einspeisung (‘Einspeisemanagement’) noch seltener auf.

4 Zusammenfassung

Die Netzbetreiber sind gesetzlich zur unverzüglichen Erhöhung der Übertragungsleistung ('Netzausbau') für erneuerbare Energien verpflichtet, allerdings nur, soweit dies (volks)wirtschaftlich zumutbar ist. Diese Anweisung zu einer gewissen Beschränkung des windbedingten Netzausbaus drückt eigentlich nur die wirtschaftliche Selbstverständlichkeit aus, dass für die wenig Energie erbringenden sehr seltenen kurzen Spitzen der Windleistung keine teure zusätzliche Übertragungskapazität von den Stromkunden bezahlt werden muss.

Bei einer volkswirtschaftlich optimalen Beschränkung des Netzausbaus werden deutlich weniger als 1% der möglichen Windenergieerzeugung 'ausgesperrt', aber je nach Einzelfall beträchtliche Netzausbaukosten eingespart. Überdies werden die Betreiber der Windenergieanlagen durch die Einspeisebeschränkung nicht schlechter gestellt, da sie ab 2009 voll entschädigt werden. Die Stromkunden werden aber geringer belastet, weil die so vermiedenen Ausbaukosten höher sind als die Entschädigungszahlungen.

Es werden Richtgrößen für die jeweils volkswirtschaftlich optimalen Beschränkung des Netzausbau bestimmt, und zwar für die Netzanbindung von Onshore-Windparks (90%-95% der dort installierten Windleistung), von Offshore-Windparks (80%-85%) und für eine großräumige windbedingte Nord-Süd-Übertragung (50%-65%).

Jarass/Obermair/Voigt:
Windenergie - Zuverlässige Integration in die Energieversorgung
Springer-Verlag, 2., vollst. neu bearb. Aufl., Juni 2009