



# **Studie zur Berechnung von Wirkarbeitsverlusten durch Blindarbeit**

---

## ***Kurzfassung***

Auftraggeber:

Bundesverband Windenergie (BWE)  
Neustädtische Kirchstraße 6

10117 Berlin



**Moeller & Poeller Engineering  
(M.P.E.) GmbH**

Europaplatz 5  
72072 Tübingen

Germany

Tel.: +49 7071 138790

Fax.: +49 7071 13879 99

Email.: [info@moellerpoeller.de](mailto:info@moellerpoeller.de)

Web: [www.moellerpoeller.de](http://www.moellerpoeller.de)

**Ansprechpartner:**

Dr.-Ing. Markus Pöller

M.P.E. GmbH

Tel.: 07071 1387910

Email: [markus.poeller@moellerpoeller.de](mailto:markus.poeller@moellerpoeller.de)

**Autoren:**

*Dipl.-Ing. Daniel Uber*

*Email: [daniel.uber@moellerpoeller.de](mailto:daniel.uber@moellerpoeller.de)*

*Dr.-Ing. Markus Pöller*

*Email: [markus.poeller@moellerpoeller.de](mailto:markus.poeller@moellerpoeller.de)*

## Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Hintergrund und Ziel der Studie .....</b>     | <b>4</b>  |
| <b>2</b> | <b>Methodik.....</b>                             | <b>5</b>  |
| <b>3</b> | <b>Ergebnisse .....</b>                          | <b>6</b>  |
| 3.1      | Netzanschluss auf Mittelspannungsebene .....     | 6         |
| 3.2      | Netzanschluss auf Hochspannungsebene .....       | 9         |
| <b>4</b> | <b>Schlussfolgerungen und Empfehlungen .....</b> | <b>13</b> |

## 1 Hintergrund und Ziel der Studie

Die in Deutschland geltenden Richtlinien zum Netzanschluss von Erzeugungsanlagen an Mittel- und Hochspannungsnetze schreiben vor, dass am Netzanschlusspunkt Blindleistung bereitzustellen ist. Derzeitige Diskussionen und Richtlinienentwürfe deuten darauf hin, dass die Anforderungen an die Blindleistungsbereitstellungsfähigkeit von Erzeugungsanlagen zukünftig eher noch verschärft werden.

Über den Abruf der Blindleistung und die daraus resultierende Blindarbeit können Netzbetreiber frei verfügen. Somit steht den Netzbetreibern bisher auch frei, diese Blindleistung zur Spannungshaltung in ihren eigenen Netzen oder zum Blindleistungsaustausch mit übergeordneten Netzen einzusetzen.

Ursprünglich setzten Netzbetreiber die durch Windparks bereitgestellte Blindleistung hauptsächlich dafür ein, den durch dezentrale Erzeugungsanlagen verursachten Spannungshub zu kompensieren, so dass eine möglichst hohe Zahl an Erzeugungsanlagen angeschlossen werden können.

In den letzten Jahren gingen jedoch viele Netzbetreiber dazu über, die verfügbare Blindleistung zur allgemeinen Spannungshaltung, auch in übergeordneten Netzen, einzusetzen, wodurch sich der Abruf der Blindleistung in Form von Blindarbeit deutlich erhöht hat.

Durch Blindarbeit erhöhen sich jedoch gleichzeitig auch parkinterne Ströme und folglich auch ohmsche Verluste, was sich wiederum auf den Ertrag und die Betriebskosten von Windparks in negativer Weise auswirkt.

Dies hat der BWE zum Anlass genommen, Ertragsminderungen, die sich durch die vermehrte Bereitstellung von Blindarbeit ergeben, im Rahmen einer Studie genauer zu beleuchten.

Die dieser Kurzfassung zugrundeliegende Studie beschäftigt sich mit den Auswirkungen des Abrufs von Blindarbeit auf die parkinternen Wirkarbeitsverluste und quantifiziert diesen Effekt für einige exemplarische Windparkkonfigurationen. Darüber hinaus werden der Einfluss des Standorts (mittlere Windgeschwindigkeit), des verfügbaren Blindleistungsstellbereichs der Erzeugungsanlage, des vom Netzbetreiber vorgegebenen Blindleistungs- oder Spannungsregelmodus sowie dessen Parametrierung (Sollwertvorgabe) untersucht.

*Unter Blindarbeit versteht man, in Analogie zur Wirkarbeit (oder Energie), die über die Zeit hinweg aufsummierte (mathematisch korrekt: integrierte) Blindleistung. Blindarbeit ist somit das Analogon zur Wirkarbeit (oder Energie), ohne dass dabei allerdings „richtige“ Energie fließen würde. Da Blindleistungsflüsse jedoch zu erhöhten Strömen führen, kann Blindleistung durchaus „richtige“ Verluste, also Wirkverluste verursachen bzw. vergrößern ( $P_v = IR^2$  -> erhöhte Ströme erhöhen die ohmschen Verluste). Wirkleistungs- oder Wirkarbeitsverluste, die durch Blindleistung verursacht werden, dürfen nicht mit dem Blindleistungsbedarf induktiver Betriebsmittel (z.B. Transformatoren oder Motoren) verwechselt werden. Unter „Blindleistungsbedarf“ versteht man Blindleistung, die aufgrund physikalischer Gesetze durch induktive Betriebsmittel verursacht wird und durch die Bereitstellung kapazitiver Blindleistung (oder Blindleistung im „übererregten Bereich“) gedeckt werden muss.*

## 2 Methodik

Um eine quantitative Abschätzung der durch Blindarbeit verursachten jährlichen parkinternen Verluste zu erhalten, werden unterschiedliche Windparkkonfigurationen an jeweils einem ertragreichen Standort und einem Binnenstandort unter dortigen Windverhältnissen exemplarisch untersucht:

- Windpark mit 7 EZE, Netzanschluss auf Mittelspannungsebene, langes Exportkabel
- Windpark mit 1 EZE, Netzanschluss auf Mittelspannungsebene, kurzes Exportkabel
- Windpark mit 16 EZE, Netzanschluss auf Hochspannungsebene
- Windpark mit 8 EZE, Netzanschluss auf Hochspannungsebene

Hinsichtlich der Anforderungen an das Blindleistungsvermögen am NVP wurden Annahmen getroffen, die bei Mittelspannungsanschlüssen über die derzeit geltenden Anforderungen hinausreichen. Entgegen der BDEW-Mittelspannungsrichtlinie [1], die einen Leistungsfaktorbereich bis zu  $\cos\phi=0,95$  fordert, wird in dieser Studie davon ausgegangen, dass ein Leistungsfaktorbereich bis zu  $\cos\phi=0,9$  gefordert wird. Eine solche Forderung wird von einigen Verteilnetzbetreibern bereits heute erhoben. Für Windparks mit Netzanschluss auf Hochspannungsebene wurden die Anforderungen der TAB-Hochspannung [2] zugrunde gelegt.

Üblicherweise werden an Windenergieanlagen, die wegen zu geringer Windgeschwindigkeit abgeschaltet sind, keine Anforderungen an die Bereitstellung von Blindleistung gestellt. Technisch ist aber auch dies machbar („Phasenschieberbetrieb“) und einige Netzbetreiber fordern bereits heute einen solchen Phasenschieberbetrieb. Aus diesem Grund wurde in einer Variante untersucht, wie sich die Anforderung nach einer Leistungs- und windunabhängigen Blindleistungsbereitstellung auf die parkinternen Wirkarbeitsverluste auswirkt.

Bzgl. der Komponenten zur Blindleistungsbereitstellung wird in den sogenannten „Basiskonfigurationen“ in allen Varianten davon ausgegangen, dass die am NVP geforderte Blindleistung allein durch die EZE bereitgestellt wird.

Für den Windpark mit 16 EZE und Netzanschluss auf Hochspannungsebene wird darüber hinaus eine Variante untersucht, in welcher ein Teil der Blindleistung durch zusätzliche statische Kompensationsanlagen an der mittelspannungsseitigen Hauptsammelschiene im UW bereitgestellt wird. Die EZE selbst arbeiten dann in einem engeren Blindleistungsbereich als in der Basiskonfiguration.

In einem ersten Schritt werden sämtliche Komponenten der Modellwindparks entsprechend der gängigen Regeln und Standards ausgelegt, so dass ein möglichst realistisches Verhalten sichergestellt ist.

Anschließend werden die Wirkleistungsverluste in Abhängigkeit der Blindleistungsflüsse der unterschiedlichen Parkkonfigurationen ermittelt.

Aus diesen Ergebnissen können dann parkinterne Wirkarbeitsverluste und die mit dem Netz ausgetauschte Blindarbeit in Abhängigkeit des Standorts (Windgeschwindigkeit) und der Blindleistungsfahrweise ermittelt werden. Als Ergebnis dieser Berechnungen wird schließlich die durch die Lieferung von Blindarbeit verursachte Ertragsminderung des jeweiligen Windparks ausgewiesen und deren Kosten ermittelt. Die Ertragsminderung berücksichtigt die sogenannten Parkverluste (Verluste auf parkinternen Kabeln und Transformatoren) sowie zusätzliche, durch Blindleistung verursachte EZE-Verluste.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Netzanschluss auf Mittelspannungsebene

Die generelle Abhängigkeit der Wirkarbeitsverluste von der gelieferten Blindarbeit ist in Abbildung 1 für einen exemplarischen Windpark mit Netzanschluss auf Mittelspannungsebene dargestellt. Die dargestellten Wirkarbeitsverluste bzw. Ertragsminderungen berücksichtigen nur denjenigen Teil der Verluste, der von der Blindleistung abhängig ist (parkinterne Kabel und Transformatoren, EZE-Verluste). Dargestellt werden die Differenzwerte zu den Verlusten bei einem Betrieb mit  $\cos\phi_i=1$ .

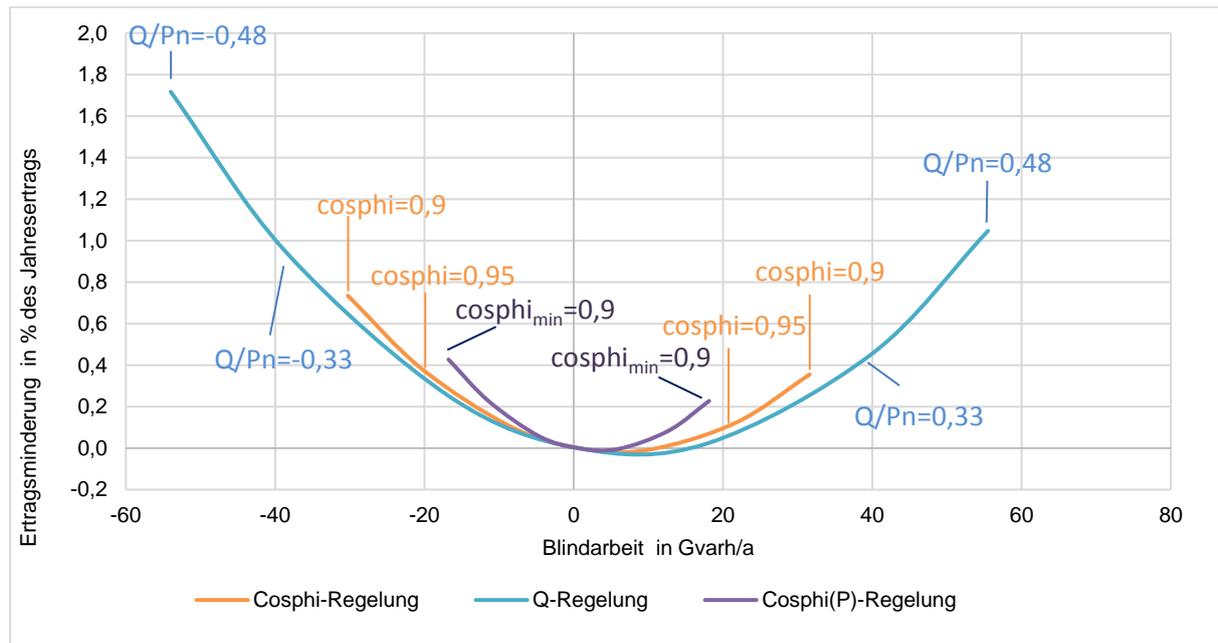


Abbildung 1: Ertragsminderung in %, bezogen auf den Jahresertrag von 67,63 GWh in Abhängigkeit der gelieferten Blindarbeit bei einem Mittelspannungspark mit unterschiedlichen Blindleistungsfahrweisen<sup>1</sup>

Generell variiert die durch Blindarbeit verursachte Ertragsminderung in Abhängigkeit der Parktopologie, des Regelverfahrens und der Sollwertvorgaben der Netzbetreiber in einem sehr weiten Bereich. Die wesentlichen Einflussfaktoren werden im Folgenden diskutiert. Negative Blindarbeit entspricht dabei untererregtem/spannungssenkendem Betrieb, positive Blindarbeit entspricht übererregtem/spannungshebendem Betrieb (siehe dazu auch Kasten auf S. 9).

#### Leistungsfaktorbereich

Wie aus Abbildung 1 ersichtlich wird, zieht die Lieferung relativ geringer Mengen an Blindarbeit nur sehr geringe Ertragsminderungen nach sich (ein konstanter Betrieb im leicht übererregten Bereich kann sich sogar verlustreduzierend/ertragssteigernd auswirken). Werden Windparks jedoch sehr häufig in ungünstigen Leistungsfaktorbereichen betrieben, steigen die durch Blindarbeit verursachten Wirkarbeitsverluste deutlich an.

<sup>1</sup> Mittelspannungspark mit 7 EZE am ertragreichen Standort, Ertragsminderung unter Berücksichtigung der Parkverluste (Verluste auf Kabeln und Transformatoren) und EZE-Verluste.

Wie aus Abbildung 1 und Tabelle 1 ersichtlich wird, kann beim exemplarisch untersuchten Mittelspannungswindpark mit 7 EZE durch den Austausch von Blindarbeit der Ertrag um bis zu ca. 1,73% (1,17GWh pro Jahr) der jährlich erzeugten Energie absinken (bei Dauerbetrieb an der unteren Blindleistungsgrenze von  $Q/P_n = -0,48$ , siehe auch Abbildung 1 und Tabelle 1). Ebenfalls gemäß Tabelle 1 würde sich am Binnenstandort sogar eine Ertragsminderung von bis zu 2,6% (1,26GWh pro Jahr) der erzeugten Energie einstellen.

Tabelle 1: Maximale, durch Blindarbeit verursachte Ertragsminderung in % des Energieertrags für unterschiedliche Strategien zur Blindleistungsregelung

| Standort               | Regelungsmodus          | Sollwert                             | Ertragsminderung       |                        |
|------------------------|-------------------------|--------------------------------------|------------------------|------------------------|
|                        |                         |                                      | 1 EZE/<br>kurzes Kabel | 7 EZE/<br>langes Kabel |
| Ertragreicher Standort | Q-Regelung              | $Q/P_n = -0,48$                      | 0,73%                  | 1,73%                  |
|                        | Konstanter $\cos(\phi)$ | $\cos\phi = 0,9$ /untererregt        | 0,32%                  | 0,73%                  |
|                        | $\cos\phi(P)$ -Regelung | $\cos\phi_{\min} = 0,9$ /untererregt |                        | 0,40%                  |
| Standort Binnenland    | Q-Regelung              | $Q/P_n = -0,48$                      | 0,94%                  | 2,63%                  |
|                        | Konstanter $\cos(\phi)$ | $\cos\phi = 0,9$ /untererregt        | 0,25%                  | 0,72%                  |

### Regelungskonzept

Im Fall einer Leistungsfaktorregelung wird im Vergleich zu einer Regelung mit konstanter Blindleistungsvorgabe (Q-Vorgabe) insgesamt deutlich weniger Blindarbeit mit dem Netz ausgetauscht und die maximale, durch Blindarbeit verursachte Ertragsminderung beträgt am ertragreichen Standort ca. 0,73% (konstanter Leistungsfaktor) bzw. 0,4% (wirkleistungsabhängig,  $\cos\phi(P)$ -Regelung) der jährlich erzeugten Energie.

Bei einer  $\cos\phi(P)$ -Regelung (wirkleistungsabhängige Leistungsfaktorregelung) wird üblicherweise bei einem Einspeiseniveau unterhalb von 50% der Nennleistung der Leistungsfaktor am Netzverknüpfungspunkt bei einem konstanten Wert von  $\cos\phi = 1$  gehalten (verlustoptimierter Betrieb). Erst bei einer Wirkleistungseinspeisung oberhalb von 50% der Nennleistung wird der Leistungsfaktor reduziert und erreicht im Vollastbetrieb seinen minimalen Wert (dieser minimale Wert ist einstellbar und wird als  $\cos\phi_{\min}$  bezeichnet).

Dieses Verfahren ist im Bereich hoher Wirkleistungseinspeisungen in Bezug auf die Spannungshaltung ähnlich wirkungsvoll wie eine Regelung mit konstantem Leistungsfaktor, jedoch in Bezug auf die Verluste deutlich wirtschaftlicher, da die Blindleistung nur dann eingesetzt wird, wenn sie tatsächlich gebraucht wird (im Bereich hoher Wirkleistungseinspeisungen, wenn die Einspeiseanlage einen nennenswerten Spannungshub verursacht).

### Länge des Exportkabels

Die Ergebnisse gemäß Tabelle 1 zeigen, dass Wirkleistungsverluste für den Windpark mit nur einer EZE deutlich geringer ausfallen als für den exemplarischen Windpark mit 7 EZE. Dies liegt insbesondere daran, dass für den Windpark mit nur einer EZE ein deutlich kürzeres Exportkabel angenommen wurde und deshalb die Kabelverluste deutlich geringer ausfallen als im größeren Windpark mit 7 EZE.

### Kosten der Bereitstellung von Blindarbeit

Bedingt durch den Austausch von Blindarbeit mit dem Netz entstehen zusätzliche Wirkarbeitsverluste, die wiederum zu einem geringeren Ertrag des Windparks führen. Diese Ertragsminderungen sind äquivalent zu variablen Kosten der Blindarbeitslieferung und fallen zusätzlich zu den fixen Kosten an, die zur Vorhaltung von Blindleistungsreserve und zur Einhaltung der Anforderungen der Richtlinien erforderlich sind (größere Umrichter, evt. höhere Kabelquerschnitte, etc.).

Bezieht man die zusätzlichen Wirkarbeitsverluste auf die Mvarh an mit dem Netz ausgetauschter Blindarbeit, so kann daraus ein Maß für die variablen Kosten der Blindarbeit abgeleitet werden. Dieser Koeffizient variiert in Abhängigkeit der Parkkonfiguration, der Regelstrategie und des Blindleistungsbeereichs zwischen einem Wert von 0 (oder sogar leicht negativ) bis zu einem Wert von 0,027MWh/Mvarh. Bei einer Anfangsvergütung von 84,1€/kWh betragen die maximalen Kosten der gelieferten Blindarbeit somit 2,27€/Mvarh (Windpark mit 7EZE/lange Exporttrasse, Binnenstandort, siehe Tabelle 2).

Dabei muss berücksichtigt werden, dass alle Kostenangaben dieser Studie nur für die hier untersuchten beispielhaften Windparkkonfigurationen und Stromrichtertechnologien gelten und die entsprechenden Kosten realer Windparks daher abweichen können.

Tabelle 2: Maximale Kosten (Opportunitäts-)Kosten der Blindarbeit in €/Mvarh für unterschiedliche Strategien zur Blindleistungsregelung

| Standort               | Regelungsmodus      | Sollwert                               | Kosten                 |                        |
|------------------------|---------------------|--|------------------------|------------------------|
|                        |                     |  | 1 EZE/<br>kurzes Kabel | 7 EZE/<br>langes Kabel |
| Ertragreicher Standort | Q-Regelung          | Q/Pn=-0,48                             | 0,76 €                 | 1,85 €                 |
|                        | Konstanter cos(phi) | cosphi=0,9/untererregt                 | 0,59 €                 | 1,43 €                 |
|                        | cosphi(P)-Regelung  | cosphi <sub>min</sub> =0,9/untererregt | - €                    | 1,43 €                 |
| Standort Binnenland    | Q-Regelung          | Q/Pn=-0,48                             | 0,84 €                 | 2,27 €                 |
|                        | Konstanter cos(phi) | cosphi=0,9/untererregt                 | 0,50 €                 | 1,43 €                 |

### Standortabhängigkeit

Es fällt auf, dass die Kosten bei Betrieb mit Leistungsfaktorregelung nur sehr geringfügig vom Standort und somit von den Windverhältnissen abhängen. Dies liegt daran, dass bei Betrieb mit Leistungsfaktorregelung die gelieferte Blindleistung von der Wirkleistung abhängig ist wodurch der Einfluss des Standorts kompensiert wird.

Bei einem Betrieb mit konstantem Q-Sollwert ist die Standortabhängigkeit etwas stärker ausgeprägt.

### 3.2 Netzanschluss auf Hochspannungsebene

Auch bei Windparks mit Netzanschluss auf Hochspannungsebene variieren sowohl die gelieferte Blindarbeit als auch die durch Blindarbeit verursachten Wirkarbeitsverluste in Abhängigkeit der Regelmethode und der Sollwertvorgabe des Netzbetreibers sehr stark (siehe Abbildung 2).

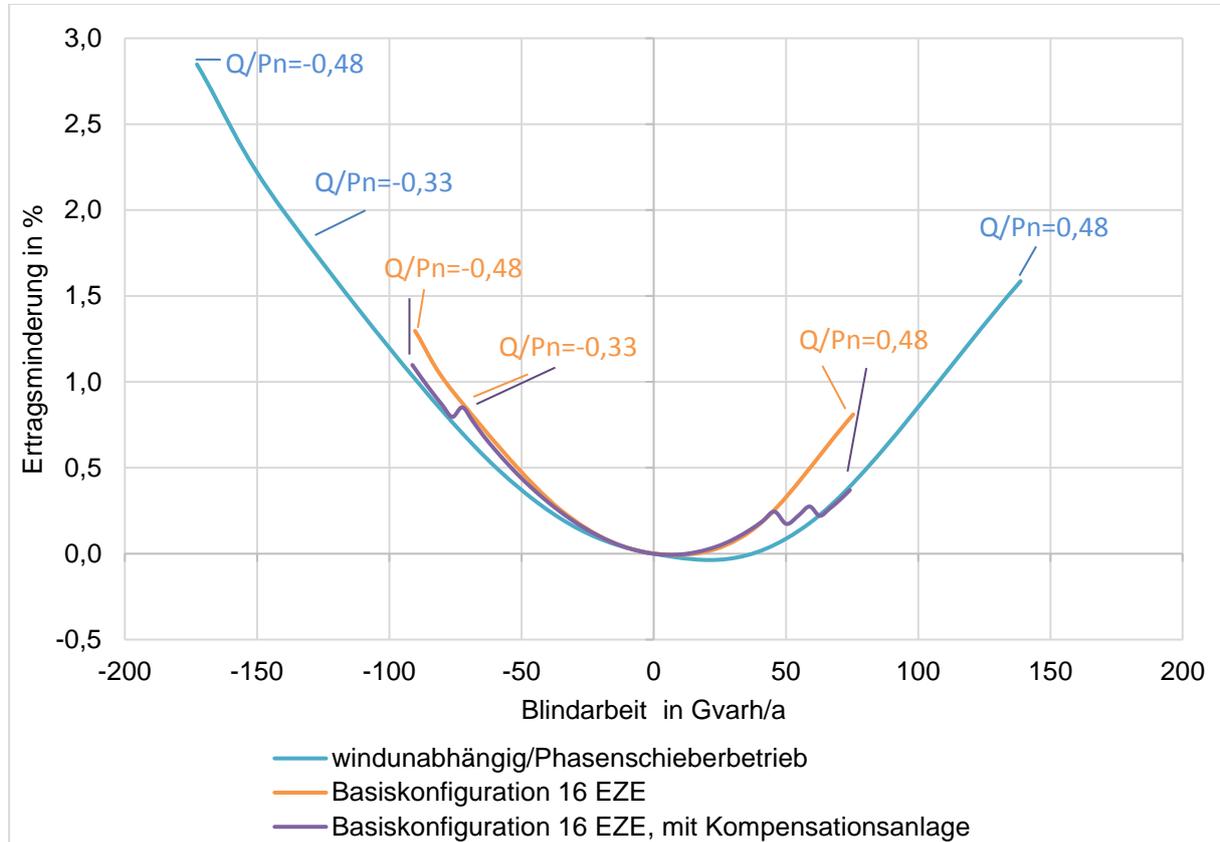


Abbildung 2: Durch Blindarbeit hervorgerufene Ertragsminderung in %, bezogen auf den Jahresertrag, in Abhängigkeit der gelieferten jährlichen Blindarbeit bei einem Hochspannungspark mit unterschiedlichen Blindleistungsfahrweisen<sup>2</sup>

#### Übererregter und untererregter Bereich

In der Basiskonfiguration (Blindleistungsbereich gemäß TAB-Hochspannung, Variante 3) beträgt die durch Blindarbeit verursachte Ertragsminderung im untererregten Bereich bis zu 1,3% der erzeugten Energie (siehe Tabelle 3). Die auf die Mvarh an gelieferter Blindarbeit bezogenen Ertragsminderungen

„Übererregter Bereich“ bezeichnet den Bereich der Blindleistung, der sich spannungsanhebend auf das Netz auswirkt (analog zu einem Kondensator). „Untererregter Bereich“ bezeichnet den Bereich der Blindleistung, der sich spannungssenkend auswirkt (analog zu einer Drossel). Die Begriffe kommen von Synchronmaschinen, bei welchen eine hohe Erregerspannung anliegen muss, um Blindleistung im übererregten Bereich bereitzustellen, während die Erregerspannung reduziert wird, um Blindleistung im untererregten Bereich bereitzustellen und somit die Spannung zu senken.

<sup>2</sup> Hochspannungspark, 16 EZE, Binnenstandort, einschl. Stromrichterverluste

variieren in einem Bereich zwischen 0 und 0,015 MWh/Mvarh, was Kosten von bis zu 1,26€/Mvarh (bei  $Q/P_n = -0,48$ ) entspricht.

*Tabelle 3: Durch Blindarbeit verursachte Ertragsminderung in % des Energieertrags und variable Kosten der gelieferten Blindarbeit (pro Mvarh) unter Worst-Case Annahmen, untererregter Bereich*

| Regelungsmodus | Konfiguration                            | Wirkarbeitsverluste | Kosten/Mvarh |
|----------------|--|---------------------|--------------|
| Q-Regelung     | Basiskonfiguration                       | 1,30%               | 1,26 €       |
| Q-Regelung     | windunabhängig/mit Phasenschieberbetrieb | 2,80%               | 1,43 €       |
| Q-Regelung     | Kompensationsanlage                      | 1,10%               | 1,01 €       |
| Q(U)-Kennlinie | Basiskonfiguration                       | 1,30%               | 1,26 €       |

Im übererregten Bereich ist die durch Blindarbeit verursachte Ertragsminderung grundsätzlich geringer als im untererregten Bereich. Übererregt bereitgestellte Blindarbeit kann zu einer Ertragsminderung von bis zu 0,8% führen (bzw. 1,6% bei Phasenschieberbetrieb, vgl. Tabelle 4).

*Tabelle 4: Durch Blindarbeit verursachte Ertragsminderung in % des Energieertrags und variable Kosten der gelieferten Blindarbeit (pro Mvarh) unter Worst-Case Annahmen, übererregter Bereich*

| Regelungsmodus | Konfiguration                            | Wirkarbeitsverluste | Kosten/Mvarh |
|----------------|--|---------------------|--------------|
| Q-Regelung     | Basiskonfiguration                       | 0,80%               | 0,93 €       |
| Q-Regelung     | windunabhängig/mit Phasenschieberbetrieb | 1,60%               | 1,01 €       |
| Q-Regelung     | Kompensationsanlage                      | 0,40%               | 0,42 €       |
| Q(U)-Kennlinie | Basiskonfiguration                       | 0,80%               | 0,93 €       |

*Neben den Blindströmen spielt bei den Verlusten auch der Einfluss der Spannung auf die Wirkströme eine Rolle:*

*Liefert ein Windpark Blindleistung im übererregten Bereich, so wird die parkinterne Spannung (U) angehoben. Durch diese Spannungsanhebung werden wg.  $P=U \cdot I_w$  bei gleicher Wirkleistung (P) die Wirkströme reduziert, wodurch die durch Wirkströme ( $I_w$ ) verursachten Verluste reduziert werden. Dieser Effekt wirkt der verlustverstärkenden Wirkung von Blindströmen entgegen.*

*Im untererregten Bereich wird die parkinterne Spannung abgesenkt. Dadurch müssen die Wirkströme zum Erhalt der Wirkleistung angehoben werden, was sich verlustverstärkend auswirkt. Im untererregten Bereich addieren sich somit Spannungs- und Blindstromeffekt, weshalb Verluste im untererregten Bereich höher ausfallen, als im übererregten Bereich.*

## Ort der Blindleistungsbereitstellung

Die Ergebnisse aus Tabelle 4 und Abbildung 2 zeigen, dass bei Einsatz einer Kompensationsanlage in Nähe des Netzanschlusspunkts, die Verluste deutlich reduziert werden können. Dies gilt insbesondere für den übererregten Bereich. Da die Kompensationsanlage einen Teil der Blindleistung direkt in Nähe des Netzanschlusspunkts generiert, müssen nicht die gesamten Blindströme durch den Park geführt werden. Gemäß Tabelle 4 ergibt sich durch Einsatz einer Kondensatorbank im Worst-Case Betrieb bei maximaler Blindleistung im übererregten Bereich eine Halbierung der Verluste (von 0,8% auf 0,4% der erzeugten Energie).

Der Einsatz einer Drossel im untererregten Bereich führt demgegenüber zu nur sehr geringen Verlusteinsparungen (vgl. Tabelle 3). Auch hier verringert die Kompensationsanlage die Verluste im parkinternen Kabelnetz, allerdings hat die Drossel selbst auch nennenswerte Verluste, wodurch die Verlusteinsparung nahezu wieder aufgehoben wird.

Grundsätzlich kann aus dieser Beobachtung geschlossen werden, dass die Entscheidung bzgl. der Strategie zur Bereitstellung von Blindleistung im konkreten Fall gut durchdacht werden muss und alle relevanten Faktoren, wie die Investitionskosten einer zusätzlichen Kompensationsanlage, Mehrkosten für einen erweiterten Blindleistungsbereich der EZE's sowie die prognostizierte Blindarbeit berücksichtigt werden sollte. Allerdings ist die zu liefernde Blindarbeit nur sehr schlecht abschätzbar, da der Netzbetreiber über den Einsatz der zur Verfügung stehenden Blindleistung frei entscheiden kann.

## Phasenschieberbetrieb

Bei Forderung nach einer Blindleistungsbereitstellung unabhängig der eingespeisten Wirkleistung („Phasenschieberbetrieb“) kann insgesamt deutlich mehr Blindarbeit erzeugt werden als in der Basisconfiguration (siehe hellblaue Kurve in Abbildung 2). Dies liegt daran, dass in diesem Fall auch im Teillastbereich immer der volle Blindleistungsbereich zur Verfügung steht.

Mit der Blindarbeit steigen die Verluste ebenfalls an. Die durch die Lieferung von Blindarbeit bewirkte Ertragsminderung liegt im untererregten Bereich im ungünstigsten Fall bei 2,8% der erzeugten Energie (1,6% im übererregten Bereich). In den hier berechneten Beispielen betragen die variablen Kosten der Blindleistungsbereitstellung im untererregten Bereich bis zu 1,43€/Mvarh (siehe Tabelle 3) und im übererregten Bereich bis zu 1€ pro Mvarh (siehe Tabelle 4).

## Spannungsregelung/Q(U)-Kennlinie

*Q(U)-Regelungen werden bisher vor allem in der Hochspannungsebene, aber immer häufiger auch für Mittelspannungsanschlüsse vom Netzbetreiber vorgegeben. Ein Q(U)-Regler definiert die vom Windpark bereitzustellende Blindleistung entsprechend einer Kennlinie. Je nach Abweichung der Spannung von einer vorgegebenen Referenzspannung muss mehr oder weniger Blindleistung bereitgestellt werden, um die Spannung zu stützen. Somit ist die Blindarbeit nur noch abhängig von der jeweiligen Parametrierung durch den Netzbetreiber und dem Spannungsverlauf am Netzanschlusspunkt.*

Die mit dem Netz ausgetauschte Blindarbeit, die sich infolge eines Betriebs mit Q(U)-Kennlinie einstellt, hängt in hohem Maße von der Sollwertvorgabe der Q(U)-Regelung und in Bezug auf das Spannungsprofil insbesondere vom Mittelwert der Spannung am NVP ab. Als Spannungsprofil wurde ein typisches Spannungsprofil eines Hochspannungsknotens zugrunde gelegt, dessen Mittelwert systematisch variiert wurde.

Die maximale Ertragsminderung treten bei einer Wahl des Spannungssollwerts auf, der deutlich unterhalb des Mittelwerts der geregelten Spannung liegt, wodurch der Windpark dauerhaft an seiner untererregten Grenze betrieben wird.

Untersucht wurde insbesondere, wie sich die Definition des Spannungssollwerts (im Verhältnis zur mittleren Spannung) auf den Austausch von Blindarbeit mit dem Netz auswirkt und welche Verluste und folglich Ertragsminderungen dies nach sich ziehen kann.

Die variablen Kosten der Blindarbeit variieren in Abhängigkeit der Differenz aus Referenzspannung und Mittelwert des Istwerts der Spannung in einem Bereich von 0,49€/Mvarh und 1,26€/Mvarh.

Der Einfluss der Differenz aus Spannungssollwert und Mittelwert der Spannung auf die Ertragsminderung ist in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Ertragsminderung durch Blindarbeit in Abhängigkeit der Referenzspannung.

| U_ref-U_m                                 | -5%  | -3%  | -1%  | 0%   | 1%   | 3%   | 5%   |
|---|------|------|------|------|------|------|------|
| Blindarbeit in Gvarh                      | 90,6 | 73,1 | 31,9 | 24,0 | 37,8 | 71,2 | 75,4 |
| Ertragsminderung durch Blindarbeit in GWh | 1,34 | 0,96 | 0,26 | 0,14 | 0,26 | 0,76 | 0,85 |
| Ertragsminderung durch Blindarbeit in %   | 1,3% | 0,9% | 0,3% | 0,1% | 0,3% | 0,7% | 0,8% |

## 4 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die Ergebnisse dieser Studie unterstreichen, dass der Abruf von Blindarbeit einen nennenswerten Einfluss auf die parkinternen Verluste haben kann. Dies gilt insbesondere für Windparks mit Netzanschluss an Hochspannung mit dem dort geltenden weiten Blindleistungsstellbereich, oder an Mittelspannung, falls sich die Forderung mancher Netzbetreiber nach einem erweiterten Blindleistungsstellbereich von bis zu  $\cos\phi=0,9$  unter Volllast durchsetzen sollte.

Darüber hinaus hat die Studie gezeigt, dass eine Verlagerung der Blindleistungserzeugung hin zum Netzanschlusspunkt parkinterne Verluste reduziert. Dies gilt insbesondere im übererregten Bereich und der Bereitstellung zusätzlicher Blindleistung durch Kondensatorbänke. Dieses Ergebnis ist nicht weiter überraschend, da es einmal mehr bestätigt, dass Blindleistung idealerweise dort erzeugt werden sollte, wo sie gebraucht wird.

Auf Basis dieser Schlussfolgerungen wird empfohlen, weiterführende Studien zur Bereitstellung von Blindleistung auf Systemebene durchzuführen und zu hinterfragen, ob eine Erweiterung des geforderten Blindleistungsstellbereichs von dezentralen Erzeugungsanlagen gesamtwirtschaftlich, unter Berücksichtigung von fixen und variablen Kosten tatsächlich sinnvoll ist.

Ziel einer optimalen Bereitstellung von Blindleistung sollte die Minimierung der Gesamtkosten für Stromerzeugung, -Übertragung und -Verteilung sein. Dabei sollte beachtet werden, dass Netzverluste möglichst geringgehalten werden und Blindströme zu einer möglichst geringen zusätzlichen Auslastung des Netzes führen, so dass die ohnehin schon knappen Übertragungskapazitäten in möglichst hohem Maße den Wirkleistungsflüssen zur Verfügung stehen. Letztlich führen diese Zielvorgaben zu nichts anderem als der altbekannten Regel, dass Blindleistung möglichst lokal, in Nähe des Bedarfs, vorgehalten werden soll.

Bei weiterführenden Studien zur Blindleistungsbereitstellung auf Systemebene sollten somit insbesondere die folgenden Aspekte berücksichtigt werden:

- Der Rückbau konventioneller Kraftwerke führt nicht notwendigerweise zu einem erhöhten Blindleistungsbedarf in der Umgebung dezentraler Erzeugungsanlagen. Die räumliche Nähe der Blindleistungserzeugung zum Blindleistungsbedarf ist somit nicht notwendigerweise gegeben<sup>3</sup>.
- Die Deckung des Blindleistungsbedarfs auf Hoch- und Höchstspannungsebene durch Mittelspannungskomponenten erhöht die Netzverluste und führt zu einer zusätzlichen Auslastung der Transformatoren in Umspannwerken.
- Die Verluste von Blindstromkompensationsanlagen auf Hochspannungsebene sind deutlich geringer als die Verluste von Blindstromkompensationsanlagen auf Mittelspannungsebene (bezogen auf die Blindleistung) und deutlich geringer als die parkinternen Verluste, die bei der Bereitstellung von Blindleistung durch Windparks auftreten.
- Der Bedarf an untererregter Blindleistung zur Spannungshaltung in Verteilnetzen steigt zwar mit zunehmendem Durchdringungsgrad dezentraler Erzeugungsanlagen, sinkt jedoch wiederum bei Einsatz größerer Kabelquerschnitte, welche bei entsprechendem Durchdringungsgrad zur Abführung der Wirkleistung ohnehin erforderlich sind.

---

<sup>3</sup> Beispielsweise kann ein erhöhter Blindleistungsbedarf, der sich zukünftig in Baden-Württemberg durch den Rückbau von Kernkraftwerken ergeben wird nicht durch Windparks in Norddeutschland gedeckt werden.

Studien, die lediglich auf Basis von Investitionskosten (CAPEX) zum Schluss kommen, dass die Bereitstellung zukünftig erforderlicher Blindleistung durch dezentrale Erzeugungsanlagen mit Netzanschluss auf Mittelspannungsebene die gesamtwirtschaftlich günstigste Variante darstellt, sollten grundsätzlich in Frage gestellt werden, da sie die deutlich wesentlicheren Faktoren, Netzverluste und Betriebsmittelauslastung, nicht berücksichtigen.

Auch um die zukünftige Entwicklung der Netze und die Bereitstellung von Blindleistung in eine richtige Richtung zu lenken, sollte sowohl über eine Vergütung der Bereitstellung von Blindarbeit als auch der Vorhaltung eines erweiterten Blindleistungsstellbereichs<sup>4</sup> dezentraler Erzeugungsanlagen nachgedacht werden. Solange ein erweiterter Blindleistungsbereich oder der Abruf von Blindarbeit nicht vergütet wird, fehlt auf Netzbetreiberseite der Anreiz, das Thema Blindleistungsbereitstellung vorbehaltlos nach gesamtwirtschaftlichen Gesichtspunkten unter Berücksichtigung fixer und variabler Kosten zu betrachten.

In Bezug auf die Planung und Auslegung von Windparks wird Planern und Betreibern empfohlen, die Kabeldimensionierung stets unter verlustoptimierenden Gesichtspunkten durchzuführen. Darüber hinaus wird empfohlen, insbesondere wenn ein erweiterter Blindleistungsstellbereich gefordert wird, die Installation zusätzlicher Kompensationsanlagen im UW als eine Alternative zur Bereitstellung der gesamten Blindleistung durch Erzeugungsanlagen in Betracht zu ziehen.

Allerdings lässt sich die abgerufene Blindarbeit und damit verbundene parkinterne Wirkarbeitsverluste über die Lebensdauer eines Windparks hinweg nur schlecht oder überhaupt nicht abschätzen, was eine verlustoptimierte Auslegung nahezu unmöglich macht.

---

<sup>4</sup> Erweitert im Vergleich zur BDEW-Mittelspannungsrichtlinie, also  $\cos\phi < 0,95$