

5 Regelung und Führung von Windkraftanlagen

Thermische Kraftwerke erlauben stets Eingriffe in die Turbinenantriebsleistung [33, 94, 98]. Bei ihnen muss unterschieden werden zwischen Reaktionen auf langfristig notwendige Veränderungen durch die Energiezufuhr und kurzzeitigen Leistungsangleichungen in begrenztem Maße über den Dampfkreislauf oder entsprechende Energietransportwege. Demgegenüber ermöglichen Diesellaggregate, Gasturbinen o. ä. Systeme (s. Bild 5.1 a) über den Netzzustand und die Anlagenregelung (bzw. Statik) die Brennstoffzufuhr und somit die Energieeinspeisung lang- und kurzfristig an die sich ändernden Verbraucherverhältnisse im vorgegebenen Leistungsrahmen anzugleichen.

Windturbinen sind hingegen der Luftströmung ausgesetzt. Diese unterliegt jedoch hauptsächlich witterungs- und standortbedingten Einwirkungen. Entsprechende Variationen des Primärenergieangebotes sind die Folge. Auf diesen Einfluss zu nehmen entfällt demnach bei Windenergieanlagen. Eine Veränderung der Leistung ist nur in Richtung geringeren Energieumsatzes möglich. Somit wird das Netz nicht nur durch Schwankungen auf der Energieabnehmerseite, sondern bei unkoordinierter Speisung aus Windkraftanlagen auch durch die Witterung bedingt in der Energiezufuhr beeinflusst (s. Bild 5.1 b).

Auf der Energieangebotsseite wirken sich *kurzzeitige Windgeschwindigkeitsänderungen* wie z. B. Böen besonders stark auf das Verhalten von Windkraftanlagen aus. Sie können zu hohen Beanspruchungen an Komponenten führen und Schwankungen der elektrischen Ausgangsgrößen (Spannung, Frequenz, Leistung) verursachen. Diese schnell ablaufenden Vorgänge beeinflussen somit die *Regeleigenschaften* des Systems. Weiterhin lassen sich Anforderungen an die Baugruppen und deren Reaktionen bestimmen, so dass die Funktionstüchtigkeit und die Integrationsfähigkeit einer Anlage gewährleistet werden. Im Gegensatz zur Regelung hat die *Betriebsführung* sowohl stets aktuelle Sollwerte vorzugeben als auch auf mittel- und langfristige Variationen vom Minuten- bis Jahreszeitbereich zu reagieren. Hohe Verfügbarkeit kann über Lastanpassung oder Energiespeicher (hier nicht näher betrachtet) erreicht werden. Außerdem lässt sich durch Energiemanagement die Bereithaltung von Leistungsreserven organisieren.

Die Verbrauchswerte und Windverhältnisse scheinen bei oberflächlicher Betrachtung völliger Zufälligkeit zu unterliegen. Aufgrund der Verbrauchergewohnheiten in Verbindung mit den Umwelteinflüssen und den physikalischen Gegebenheiten bei entsprechenden Windverhältnissen sind jedoch gewisse Abhängigkeiten vorhanden. Diese genau zu strukturieren, in Konfigurationen zu übertragen und im Einspeise- und Lastmanagement z. B. entsprechend Bild 5.2 zu nutzen, muss besondere Bedeutung zukommen, um den Wert der Windenergie steigern zu können.

Für die Regelung einer Windkraftanlage sind allein die kurzzeitigen Windgeschwindigkeitsänderungen von Bedeutung, während die Betriebsführung auch Variationen im mittelfristigen Bereich zu berücksichtigen hat. Von der Betriebsführung wird in Kombination mit der Anlagenregelung gefordert, dass sowohl den Eigenschaften und Bedingungen der Verbraucher als auch denen der Anlage selbst und ihrer Komponenten in ausreichendem Maße Rechnung getragen wird. Auf diese Anforderungen soll zunächst kurz eingegangen werden.

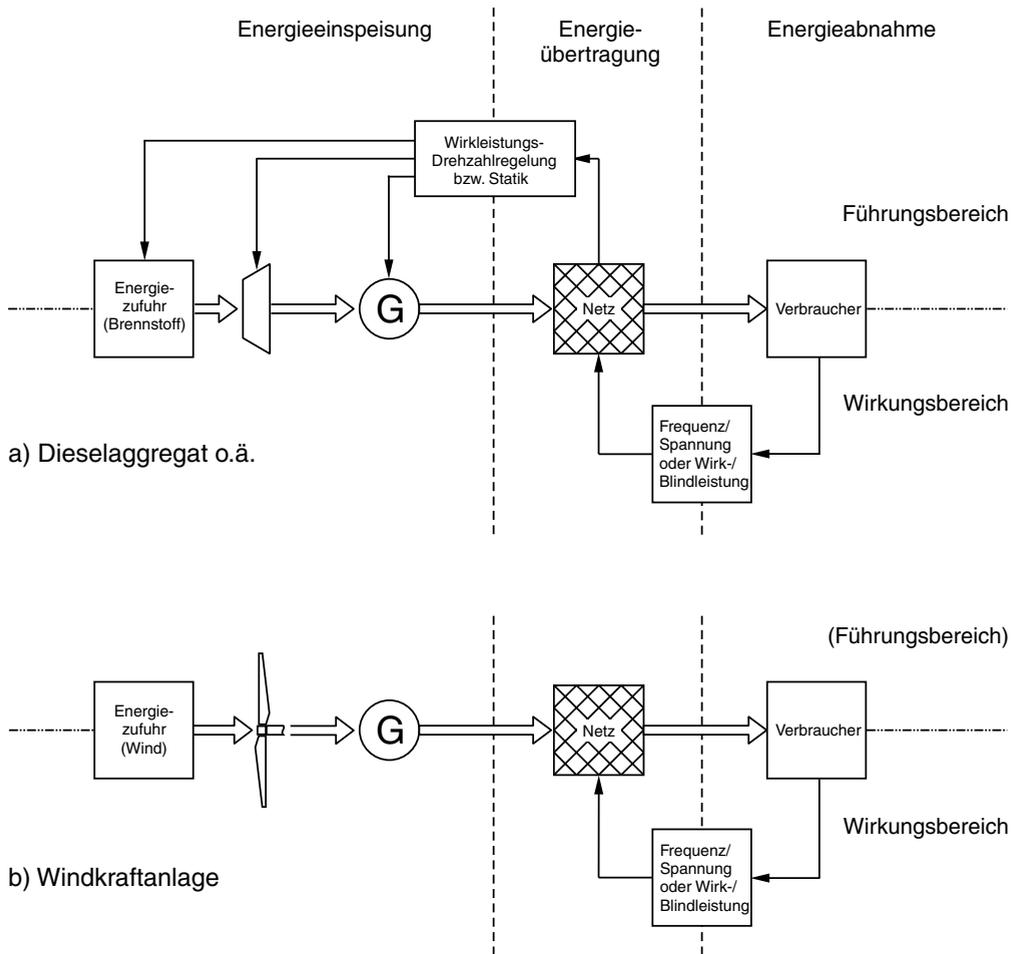


Bild 5.1: Energiefluss und Unterschiede im Wirkungs- und Führungsbereich von elektrischen Versorgungssystemen mit a) Dieselaggregaten o. ä. und b) Windkraftanlagen bei ungeführter Einspeisung

5.1 Systemanforderungen und Betriebsarten

Bei der Regelung und Betriebsführung einer Windkraftanlage müssen interne Gegebenheiten (Eigenschaften der Baugruppen und deren Zusammenspiel) sowie externe Vorgaben (Verbraucherwünsche, Bestimmungen für Netzparallelbetrieb) beachtet werden.

Durch die Betriebsführung werden über logische Verknüpfungen Entscheidungen gefällt. Dabei wird überwacht, ob Ablaufpläne befolgt und Grenzwerte etc. eingehalten werden. Die Regelung hingegen muss auf die Anlage zugeschnittene und von der Betriebsführung vorgegebene Werte einhalten. Dementsprechend ist sicherzustellen, dass Entscheidungen der Betriebsführung nicht direkt an die Stellglieder (z. B. die Blattverstellereinrichtung) der Anlage geleitet werden. Soweit es mit den Reaktionsgeschwindigkeiten zu vereinbaren ist, sollten Vorgaben der Betriebs-

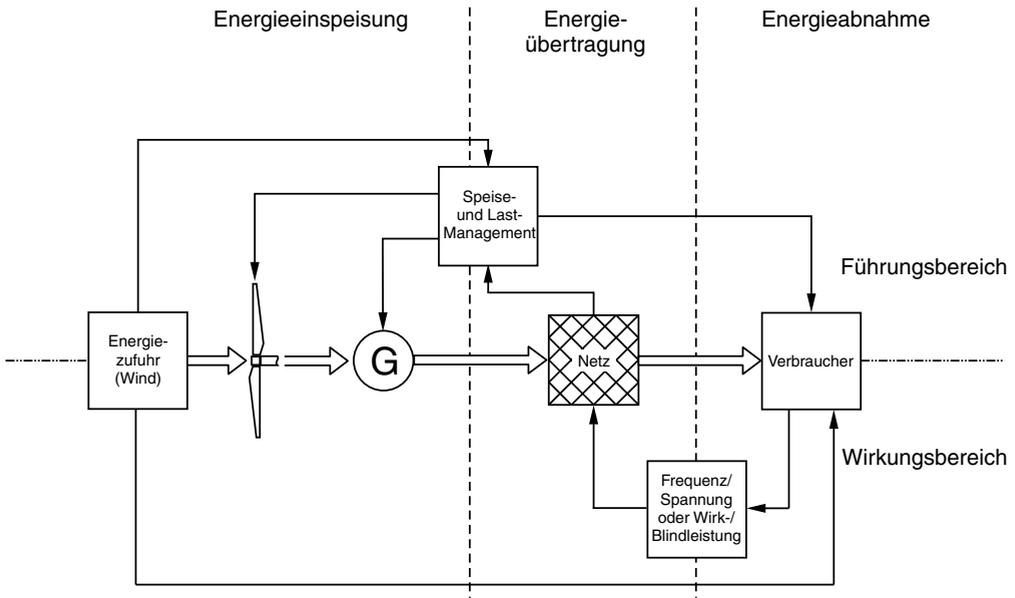


Bild 5.2: Energiefluss eines elektrischen Versorgungssystems mit geführter Windenergieeinspeisung

führung über die Regelungseinheiten erfolgen. Damit wird bei Eingriffen der Komponenten und der gesamten Anlagendynamik Rechnung getragen. Ausnahmen sollten nur aus sicherheitstechnischen Gesichtspunkten (Schnellabschaltvorgänge bei Störungen usw.) zugelassen werden.

Neben den üblichen Eigenschaften für Anlagen zur Energieumwandlung sind für den Betrieb von Windkraftanlagen zusätzlich zu fordern:

- automatische Inbetriebnahme und selbsttätiges Stillsetzen in Abhängigkeit von den Wind- und Anlagengegebenheiten,
- sicherheitstechnische Überwachung der Anlagenkomponenten durch eine Betriebsführungseinheit mit Fernabfrage und Störungsmeldungen beim Betreiber bzw. Wartungsdienst,
- Möglichkeit zur Regelung von Anlagendrehzahl und elektrischer Ausgangsleistung,
- separater, von der Regelung unabhängiger Schutz zur schnellen Begrenzung der Leistungsaufnahme des Windrades bei zu großem Windenergieangebot,
- auf den Energieabnehmer abgestimmtes Verhalten aller elektrischen Anlagenteile in Hinblick auf Netzeinwirkungen u. ä. Zukünftig sollten die Voraussetzungen zur
- Fehlerfrüherkennung geschaffen und daraus resultierende Vorteile genutzt werden.

Hinsichtlich der Anforderungen ist prinzipiell zwischen Insel- und Netzbetrieb zu unterscheiden. Im Inselbetrieb sind die rein anlagenspezifischen Gegebenheiten zu berücksichtigen. Darüber hinaus müssen die Ansprüche der Verbraucher einfließen, die jedoch nur für den Einzelfall

genau definiert werden können. Einzuhalten sind grundsätzlich die einschlägigen elektrotechnischen Bestimmungen, insbesondere zur Nullung und zum Schutz gegen Überspannungen etc. (VDE 0 100 sowie IEC 555). Für den Netzbetrieb sind überdies die örtlich vorgegebenen Bedingungen für den Parallelbetrieb von Stromerzeugungsanlagen mit dem Netz [58, 136, 96, 135] zu erfüllen.

Die Regelung einer Windkraftanlage stellt das Bindeglied zwischen der Betriebsführung und der eigentlichen Windturbine bzw. deren Komponenten dar. Sie muss insbesondere auf die dynamischen Eigenschaften und Belastungsmöglichkeiten der Anlagenkomponenten zugeschnitten sein, um die ihr zukommenden Anpassungsaufgaben erledigen zu können. Dabei sind insbesondere anlagenspezifische Verhaltensweisen von Teilsystemen zu berücksichtigen (z. B. Naben und Generatorträge, Blattverstellmomente etc.).

Die zahlreichen Aufbauarten und Anwendungsmöglichkeiten von Windkraftkonvertern erfordern unterschiedliche Regelungskonzeptionen [144, 175, 172, 174]. Eine Aufgliederung in

- Insel-,
- Netz- und
- Verbundbetrieb

lässt die Zuordnung verschiedener Arten der Regelung zu und ermöglicht es, anwendungsbezogene Unterschiede herauszuarbeiten.

Dies ist erforderlich, um für den geplanten Einsatz einer Windkraftanlage die Anforderungen an die Systemkomponenten und Betriebsmöglichkeiten definieren zu können. Dazu lassen sich zahlreiche Kriterien heranziehen, wie Gesamtwirkungsgrad der Anlage, Kosten, Auswirkungen auf das Netz, Betriebszuverlässigkeit, Einsatz von bewährten, seriengefertigten Bauteilen usw. [173].

Die Wechselwirkung zwischen Einspeisesystemen und Verbrauchern bestimmt das Verhalten der gesamten Konfiguration bei schwachen Netzen und vor allem im Inselbetrieb sehr stark. Dieser soll daher im folgenden kurz dargestellt werden.

5.2 Inselbetrieb von Windkraftanlagen

Die Windkraftanlage ist im sogenannten Inselbetrieb nicht mit einem elektrischen Versorgungsnetz verbunden, sondern er speist die angeschlossenen Verbraucher direkt. Zur mechanisch-elektrischen Energieumwandlung ist im Alleinbetrieb, d. h. bei einem Versorgungssystem mit nur einer Einspeiseeinheit, insbesondere der spannungsgeregelte Synchrongenerator geeignet. Der Einsatz eines Asynchrongenerators erfordert bei gewünschter Spannungskonstanz die Bereitstellung von geregelter Erregerblindleistung. Die Ansprüche der Verbraucher an die maximale Schwankungsbreite von Spannung und Frequenz am Generator sowie durch Anlagenkomponenten vorgegebene Höchstdrehzahlen grenzen die Variationsmöglichkeiten ein und bestimmen die regelungstechnische Konzeption. Eine direkte Versorgung elektrischer Verbraucher durch Windkraftanlagen im Alleinbetrieb lässt sich bei genügend großem Windenergieangebot durch

- Drehzahlregelung an der Windturbine, d. h. Frequenzhaltung am Generator, über
- gezielte Einwirkung auf die Turbinenleistung

erreichen, falls die

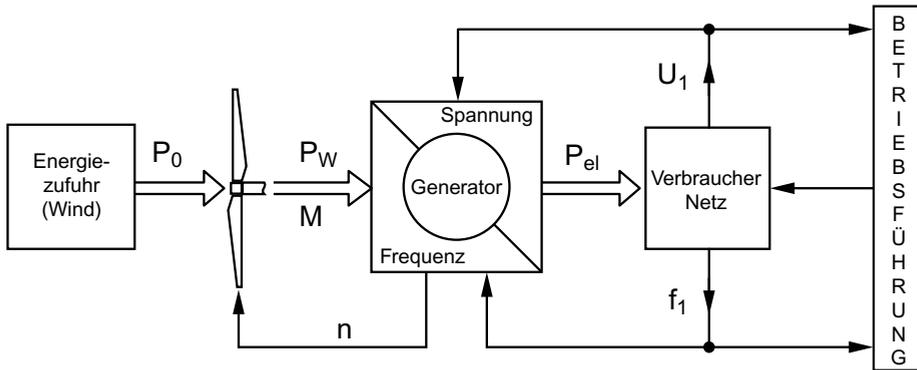


Bild 5.3: Wirkungsbereiche beim Inselbetrieb von Windkraftanlagen

- Spannung am
 - mechanisch-elektrischen Wandlersystem oder
 - Verbraucher

entsprechend den Anforderungen durch Ausgleich der notwendigen

- Blindleistung über
 - Änderung der Generatorerregung,
 - Kondensatoren bzw.
 - statische oder rotierende Phasenschieber

eingehalten werden kann (s. Bild 5.3). Dabei sind z. B. beim Synchrongenerator der Frequenzwert und die zugehörige Spannungsbildung voneinander abhängig. Vereinfacht können jeweils separate Regelkreise – eventuell unter Verwendung von Entkopplungsnetzwerken – gebildet werden [176, 165].

Entsprechend der gezeigten Zuordnung der Wirkungsbereiche im Generator von

- Wirkleistung und Frequenz f_1 bzw.
- Blindleistung und Spannung U_1 (in Verbindung mit der elektrischen Abgabeleistung P_{el})

lassen sich dann in gewissen Grenzen beide Netzzustandsgrößen (f , U) als weitgehend entkoppelte Ein- bzw. Auswirkungsarten betrachten.

Die im Wind enthaltene Leistung P_0 wird entsprechend dem Turbinenzustand als Anteil P_W bzw. Drehmoment M vom Windrad weitergegeben. In Wechselwirkung zwischen Antriebs- und Lastmoment, das durch die Verbraucher hervorgerufen wird, entsteht die Generatorfrequenz bzw. -drehzahl.

Überschreitet die Verbraucherlast das Leistungsvermögen der Windkraftanlage, so kann ein geordneter Betrieb nur aufrecht erhalten werden, wenn die