

# Die modulare Wind/Diesel-Versuchsanlage auf dem DEWI-Testfeld

The modular Wind-Diesel test station on the DEWI test site

Gerdes, Gerhard J.; Santjer, Fritz

## Summary

*With the inauguration of the test site on June 3rd, 1993 DEWI's wind diesel test station was officially opened for operation. The experimental wind-diesel system is based on a highly modular and flexible concept. It was designed to meet the requirements of a broad range of experimental investigations for optimization of control strategies, for system and single component layout, and for the verification of simulation codes. The main goal of these investigations is the development of a reliable, economic efficient wind-diesel system with a sophisticated control strategy and a simple technical design as well as the development of a design and optimization tool for wind-diesel and renewable energy systems.*

*This paper describes the layout of the system, consisting of three different wind turbines, a diesel generator, a battery system, a wind turbine simulation unit, programmable consumer loads, a dumpload, a filter system, as well as an electric battery car. Further the emphasis of the development and research activities is outlined and first results are presented.*

## 1. Einleitung

Mit der Einweihung des Testfeldes am 3. Juni 1993 fand die offizielle Inbetriebnahme der Wind/Diesel-Versuchsanlage des DEWI statt. Diese Anlage dient der experimentellen Untersuchung, der Entwicklung und Optimierung von Wind/Dieselsystemen sowie der Erprobung und Optimierung von Einzelkomponenten zur Energieerzeugung und -speicherung in regenerativen Energiesystemen. Neben dem Einsatz für Forschungs- und Entwicklungsaufgaben des DEWI steht die Anlage den Herstellern von Komponenten (Windenergieanlagen, Dieselgeneratoren, Energiespeicher etc.) sowie Energieversorgungsunternehmen und Forschungsinstituten für Forschungs- und Testzwecke zur Verfügung.

Unter dem Begriff Wind/Diesel versteht man ein autarkes Energiesystem, in dem ein Dieselgenerator und eine Windenergieanlage (WEA) - oder auch mehrere Diesel und WEA - gemeinsam die elektrische Versorgung von Verbrauchern übernehmen, die mit dem öffentlichen Netz nicht verbunden sind. Das Verhältnis der aus Wind erzeugten Energie zur gesamten Energieerzeugung ist hierbei so groß, daß die Leistungsabgabe der WEA einen nennenswerten Einfluß auf den Betrieb des Diesels ausübt und somit auf das Verhalten des gesamten Systems.

Elektrische Energieverbraucher, die unabhängig von einem öffentlichen Netz betrieben werden und deren Versorgung bislang nur mit Dieselgeneratoren durchgeführt wurde, gibt es in vielen entlegenen oder infrastrukturalarmen Gebieten der Erde. Hierbei verursachen die oft langen Transportwege für den Dieselmotorkraftstoff enorme Kosten. Das Konzept des Wind/Diesels erlaubt es zum einen den Kraftstoffverbrauch solcher reinen Dieselsysteme erheblich zu senken, zum anderen birgt es die Möglichkeit, Windenergieanlagen in autarken Energiesystemen einzusetzen und gleichzeitig auf aufwendige und derzeit noch relativ teure Langzeit-Speichersysteme verzichten zu können. Der weltweite Bedarf an Wind/Dieselanlagen wird auf mehr als 500.000 Einheiten geschätzt.

Das Konzept des Wind/Dieselsystems am DEWI beruht auf einem sehr flexiblen und modularen Aufbau, der Untersuchungen und Erprobungen von Wind/Diesel- und regenerativen Energiesystemen in einer großen Variationsbreite erlaubt. Experimentelle Untersuchungen zur Entwicklung und Optimierung von Kontroll- und Betriebsführungsstrategien, zur System- und Einzelkomponentenauslegung sowie zur Verifizierung von Computercodes, die der Auslegung und Optimierung von regenerativen Energiesystemen dienen, sind durchführbar. Die Aufgabe bei der Entwicklung von Wind/Diesel-Systemen besteht hauptsächlich in ihrer technischen und wirtschaftlichen Optimierung. Die Auslegung dieser Anlagen muß mit Rücksicht auf meteorologische Rahmenbedingungen und auf die Laststruktur der Energieverbraucher erfolgen.

## 2. Die Auslegung der Wind/Dieselanlage

Der schematische Aufbau der Anlage ist Abb. 1 zu entnehmen und gliedert sich in folgende Einzelkomponenten:

- 3 Windenergieanlagen mit Nennleistungen von jeweils 30 kW. Zur Untersuchung der Auswirkung unterschiedlicher WEA-Typen auf das Betriebsverhalten des Wind/Dieselsystems wurden drei gängige Anlagenkonzepte gewählt:

- eine stallgeregelte drehzahlstarre Anlage
- eine pitchgeregelte drehzahlstarre Anlage
- eine drehzahlvariable pitchgeregelte Anlage

Bisher aufgebaut ist die drehzahlstarre Anlage mit Blattverstellung (Pitchregelung), eine HSW 30 der Firma Husumer Schiffswerft (Rotordurchmesser von 12,5 m). Die Stallanlage E 12330/30 der Firma Südwind wird im Herbst diesen Jahres errichtet, der Aufbau der drehzahlvariablen Anlage ist für Beginn des nächsten Jahres vorgesehen.

- Ein Dieselgenerator, 30 kW elektrische Leistung, mit einem Synchrongenerator. Der Generator kann vom Motor durch eine elektrische Kupplung getrennt werden. Ein Betrieb als Phasenschieber zur Kompensation von induktiven Lasten sowie als Kurzzeitspeicher zum Auffangen kurzzeitiger Netzschwankungen ist somit möglich.
- Ein Batteriesystem, Blei- oder Nickel-Cadmium-Akkus mit Ladegerät und Wechselrichter, ist derzeit in der Planung. Die Kapazität der Batterie wird mit ca. 5 kWh zunächst für eine kurzzeitige Versorgung der Energieverbraucher ausgelegt, um das Start/Stop-Verhalten des Diesels beeinflussen zu können, die Nennleistung des Wechselrichters wird 30 kW betragen. Der Speicher ist erweiterbar, so daß auch Anlagenkonzepte mit einer hohen Deckung des Energieverbrauchs durch regenerative Energien erprobt werden können.
- Ein WEA-Simulator, bestehend aus einem Motor-Generatorsatz und einer PC-gestützten Steuerung, dient zur Simulation verschiedener WEA-Typen und unterschiedlicher Windregime. Durch die Steuerung des Antriebsmotors mit einer freiprogrammierbaren Regelung lassen sich das Betriebsverhalten und die Leistungscharakteristiken verschiedener WEA simulieren. Als Eingangsgröße dieser simulierten Windkraftanlage dienen Zeitreihen der Windgeschwindigkeit, die von beliebigen Standorten stammen und unterschiedliche Jahresmittelwerte und Turbulenzintensitäten des Windes aufweisen können. Auf diese Weise läßt sich das Betriebsverhalten einer WEA an einem gegebenen Standort durch Hardwaresimulation nachvollziehen, so daß auch das Gesamtverhalten des Wind/Dieselsystems an diesem Standort überprüft werden kann. Zudem ist es möglich, die Generatoren der eingesetzten WEA auf diesem Motor-Generator-Stand zu vermessen und ihr dynamisches Verhalten zu überprüfen.
- Ein veränderbares Netzfilter und Kompensationseinrichtung ermöglicht die Untersuchung von Maßnahmen zur Steigerung der Netzqualität. Es sorgt für die Reduzierung von Oberwellen im Netz, die durch den Betrieb von Wechselrichtern entstehen, und für die Kompensation von Phasenverschiebungen, die aus dem Betrieb induktiver Anlagenkomponenten resultieren.
- Eine Dumpload ermöglicht den Betrieb leistungsgeregelter WEA am Wind/Dieselnetz. Bei gutem Windangebot aber mäßigem Energieverbrauch kann überschüssige Leistung der WEA mit regelbaren ohmschen Widerständen abgeführt werden. Die Dumpload dient zur Drehzahlkontrolle der leistungsgeregelten Anlagen und verhindert somit einen Anstieg der Netzfrequenz auf Werte oberhalb der Nennfrequenz.
- Eine regelbare ohmsche Verbraucherlast dient zur Simulation von elektrischen Verbrauchern. Der Energieverbrauch der ohmschen Widerstände kann über die Betriebsführung in Stufen von 1 kW auf eine Last von 0 bis 79 kW eingestellt werden. Mit dieser Einrichtung ist es somit möglich den zeitlichen Lastgang beliebiger elektrischer Energieverbraucher zu simulieren, z.B. von Einzelverbrauchern wie Farmen, Krankenhäusern, Gewerben oder Industriebetrieben sowie kleinen Dörfern oder Inseln.
- Eine regelbare elektronische Verbraucherlast dient ebenfalls zur Simulation von zeitlich variablen elektrischen Verbrauchern. Im Gegensatz zur ohmschen Last wird die Energie aus dem Wind/Dieselsystem jedoch über einen elektronischen Umrichter in das öffentliche Netz eingespeist. Die Leistung ist zwischen 0 und 75 kW kontinuierlich regelbar.

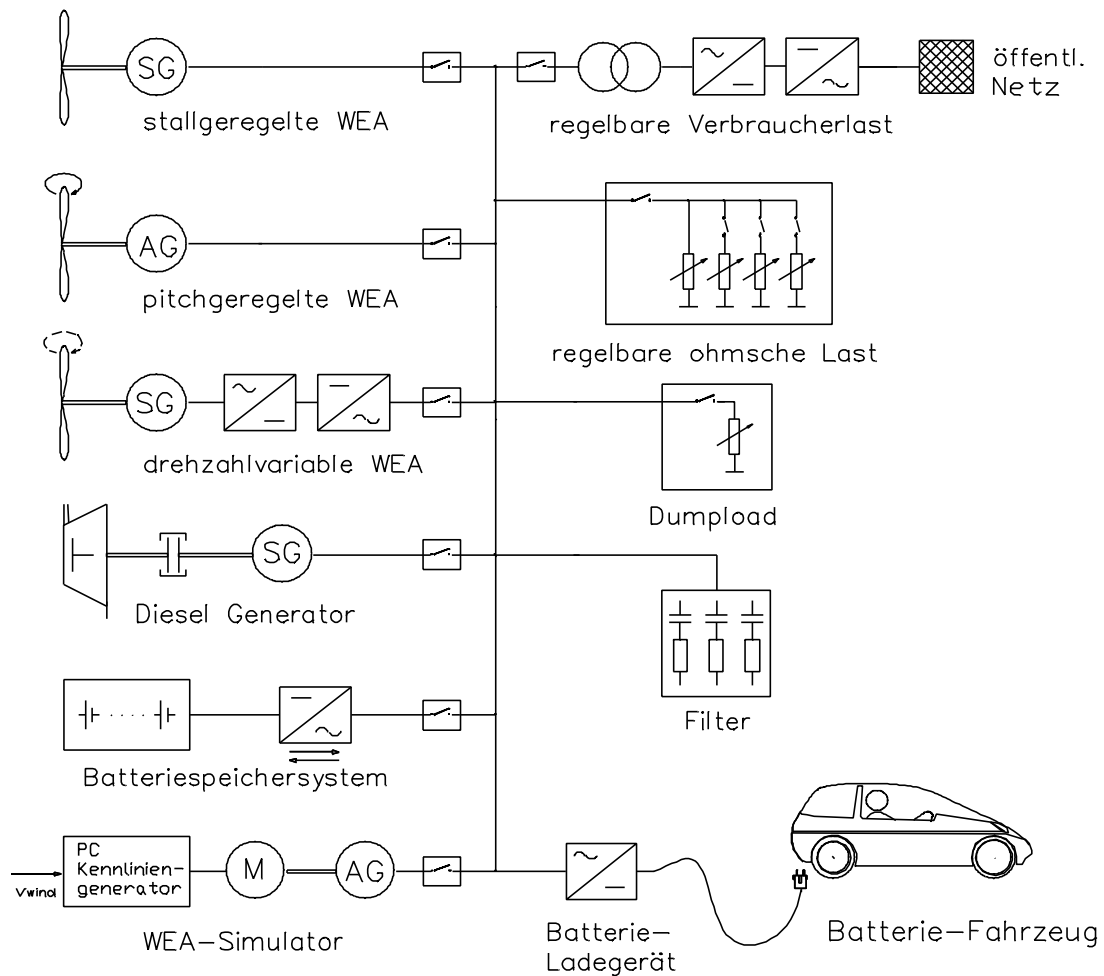


Abb. 1: Blockschaltbild der Wind/Dieselanlage auf dem DEWI Testfeld  
 Fig. 1: Principle setup of the wind-diesel system on the DEWI test site

- Ein Batteriefahrzeug, das im Laufe dieses Jahres beschafft wird, wird mit elektrischer Energie aus dem Wind/Dieselsystem betrieben werden. Das Fahrzeug soll hauptsächlich für den Pendelverkehr zwischen dem Testfeld und dem DEWI-Hauptgebäude (ca. 15 km Entfernung) eingesetzt werden.
- Eine Betriebsführung (nicht eingezeichnet) übernimmt die Überwachung der gesamten Anlage. Sie besteht aus einer freiprogrammierbaren Steuerung, so daß verschiedene Strategien zur Betriebsführung und zum Lastmanagement empirisch erprobt werden können.
- Eine Meßdatenerfassung (nicht eingezeichnet) zeichnet sämtliche anlagenrelevanten Größen auf. Neben meteorologischen Daten (Windgeschwindigkeit, -richtung, Außentemperatur etc.) werden die elektrischen Wirk- und Blindleistungen aller einzelnen Anlagenkomponenten erfaßt ebenso wie spezifische betriebswichtige Größen (Drehzahlen, Drehmomente, Zustandssignale etc.). Das Meßdatenerfassungsgerät basiert auf einer busorientierten, modularen Struktur und kann durch zusätzliche Module auf einige hundert Ein- und Ausgabekanäle erweitert werden.

Das Regelungskonzept der Anlage sieht vor, Frequenz und Spannung des Netzes in einem vorgegebenen Bereich konstant zu halten. Dies geschieht unabhängig durch die verschiedenen Einzelkomponenten der Anlage: So wird beispielsweise das Ansteigen der Frequenz auf Werte oberhalb der Nennfrequenz (50 Hz) durch die Regelung der Dumpload oder der WEA selbst verhindert, ein Abfallen der Frequenz unterhalb des Nennwertes wird durch das Batteriesystem und nicht zuletzt vom Dieselgenerator aufgefangen. Der Regelalgorithmus der Betriebsführung des Gesamtsystems ist diesen unabhängigen Regelungen der Einzelkomponenten übergeordnet und erlaubt die Entwicklung, Untersuchung und Optimierung verschiedener Kontrollstrategien für Energie- und Lastmanagement.

Die Verbindung der einzelnen Anlagenkomponenten erfolgt über ein 3-phasiges elektrisches Standardnetz mit einer Spannung von 400 V und einer Frequenz von 50 Hz. Im Zusammenhang mit der

grundlegenden, unabhängigen Regelung der Einzelkomponenten sowie der überlagerten intelligenten Betriebsführung erlaubt dies eine große Bandbreite verschiedener Systemkonfigurationen. Komponenten zur Energieerzeugung, Speicherung und Verbrauch, die sich sinnvoll in ein regeneratives Energiesystem einfügen, können in das Wind/Dieselsystem eingebunden werden.

### **3. Arbeitsschwerpunkte**

Die Arbeiten, die am DEWI im Bereich der Wind/Dieselsysteme durchgeführt werden, haben die Optimierung dieser Anlagen in technischer, energetischer und wirtschaftlicher Hinsicht zum Ziel. Als Ergebnis soll das Konzept einer Anlage entstehen, die möglichst ohne Batteriespeicher auskommt, trotzdem aber keine häufigen Start/Stops des Dieselgenerators erfordern, und die Dank einer intelligenten Betriebsführung und einer optimierten Auslegung eine größtmögliche Verminderung des Kraftstoffverbrauches erzielt. Eine solche Anlage sollte möglichst einfach gehalten sein, so daß auch technisch wenig geschultes Personal diese Anlage bedienen kann, zudem sollten die Wartungsintervalle für das gesamte System so groß wie möglich sein.

Bei der technischen Optimierung stehen Lebensdauer, stabiles Regelverhalten, Netzqualität sowie Wartungs- und Bedienungsfreundlichkeit im Vordergrund. Notwendig ist es deshalb, die Tauglichkeit unterschiedlicher WEA-Konzepte für Wind/Dieselsysteme zu untersuchen. Beispielsweise haben drehzahlstarre WEA, deren Leistungsabgabe ohne Verzögerung auf Schwankungen der Windgeschwindigkeit reagiert, andere Auswirkungen auf den Betrieb des Diesels als eine drehzahlvariable WEA, die sich aufgrund der Massen ihres Rotors, die beschleunigt werden müssen, wesentlich träger verhält.

Die Untersuchungen zur technischen Optimierung müssen im Wesentlichen zwei Arten der Installation von Wind/Dieselsystemen berücksichtigen: die Integration in bestehende elektrische Versorgungssysteme mit vorhandenen Dieselgeneratoren sowie den Aufbau gänzlich neuer Systeme. Während beim Einbau in bestehende Anlagen das Regelungskonzept entsprechend den Erfordernissen des bisherigen Dieselbetriebes ausgelegt werden muß, kann in neuen Systemen auch der Dieselmotor an den kombinierten Wind/Dieselbetrieb angepaßt werden. Untersuchungen hinsichtlich des optimierten Betriebes von Dieselgeneratoren werden sich auf den Betrieb im Teillastbereich und das Start/Stop-Verhalten erstrecken. Mit modernen Dieselmotoren (elektronische Einspritzung, Flüssigkeitskühlung) können höhere Wirkungsgrade und der Betrieb bei sehr niedrigen Lasten (15 - 25%) erzielt werden. Die Integration drehzahlvariabler Dieselgeneratoren könnte eine weitere Verbesserung des Teillastbetriebes erbringen. Die Einführung standardisierter Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Qualität des Dieselbetriebes (Schadstoffemission, Maschinenverschleiß und Kraftstoffverbrauch) ist beabsichtigt.

Die zur energetischen Optimierung von Wind/Dieselsystemen erforderlichen numerischen Simulationsrechnungen sollen experimentell an der realen Anlage verifiziert werden. Ziel ist es hierbei, die Art und optimale Größe der Energieerzeuger und der Energiespeicher zu bestimmen sowie Betriebsführungs- und Lastmanagementstrategien zu finden, die eine maximale Ausnutzung der Windenergie und eine Minimierung des Kraftstoffverbrauchs zur Folge haben. Zudem sollen Strategie und Auslegung einen möglichst schonenden Betrieb der Anlagenkomponenten gewährleisten.

Ein weiteres Vorhaben ist die Untersuchung von kleinen Windparks am Wind/Dieselnetz. Erforscht werden muß die mögliche zeitliche Vergleichmäßigung der Leistungsabgabe, d.h. eine Verringerung von Fluktuationen der Windenergieerzeugung sowie der Einfluß eines vergleichsweise hohen Anteils von Windenergie - bezogen auf die Leistung des Dieselgenerators - auf den Betrieb des Gesamtsystems.

### **4. Weitere Möglichkeiten für den Einsatz der Wind/Dieselanlage**

Die experimentelle Wind/Dieselanlage bietet die Möglichkeit, Ausbildung und Schulung für potentielle Betreiber autarker Inselssysteme durchzuführen. Zudem kann die Anlage von anderen Institutionen und Forschungseinrichtungen für experimentelle Untersuchungen genutzt werden. Durch zusätzliche regenerative Energieerzeuger (z.B. Photovoltaik) und Energiespeicher mit einer größeren Kapazität kann die Anlage für zukünftige Projekte auf ein regeneratives Inselssystem ausgebaut werden in dem der Diesel nur noch die Funktion eines Hilfs- und Notstromgenerators hätte.

Ein weiteres interessantes Konzept ergibt sich durch die Einbindung von Elektrofahrzeugen. So haben beispielsweise kleine Inseln oder entlegene Gebiete das Problem, daß der zum Betrieb von Kraftfahrzeugen erforderliche Kraftstoff oftmals über lange Transportwege herangebracht werden muß. Hier kann sich der Einsatz von Elektrofahrzeugen mit auswechselbaren Batterien, die mit Hilfe von Windenergie wiederaufgeladen werden, bereits wirtschaftlich lohnen oder aus umweltpolitischen Gründen interessant werden. Ein solches Projekt könnte für den Einstieg in ein Verkehrskonzept auf der Basis regenerativer Energien beispielhaft werden.

## 5. Messungen am Wind/Dieselsystem

Die bisherigen Vermessungen brachten erste Erkenntnisse über das Verhalten der Einzelkomponenten und des Gesamtsystems. Die Kennlinie des Kraftstoffverbrauches des Dieselgenerators ist in Abb. 2 dargestellt. Im Bereich vom Leerlauf bis zur Nennleistung (30 kW) ist der Kraftstoffverbrauch annähernd linear. Oberhalb der Nennleistung steigt er exponentiell an. Im Bereich unterhalb des Leerlaufs wird der Dieselmotor als rotierende Last betrieben. Bei einer Leistung von ca. -15 kW ist der Kraftstoffverbrauch auf null abgesunken. Der Diesel läßt sich theoretisch als Dumpload zur Aufnahme von Überschußleistung der WEA verwenden, jedoch ist dieser Betrieb mit einem erhöhten Verschleiß des Aggregates verbunden.

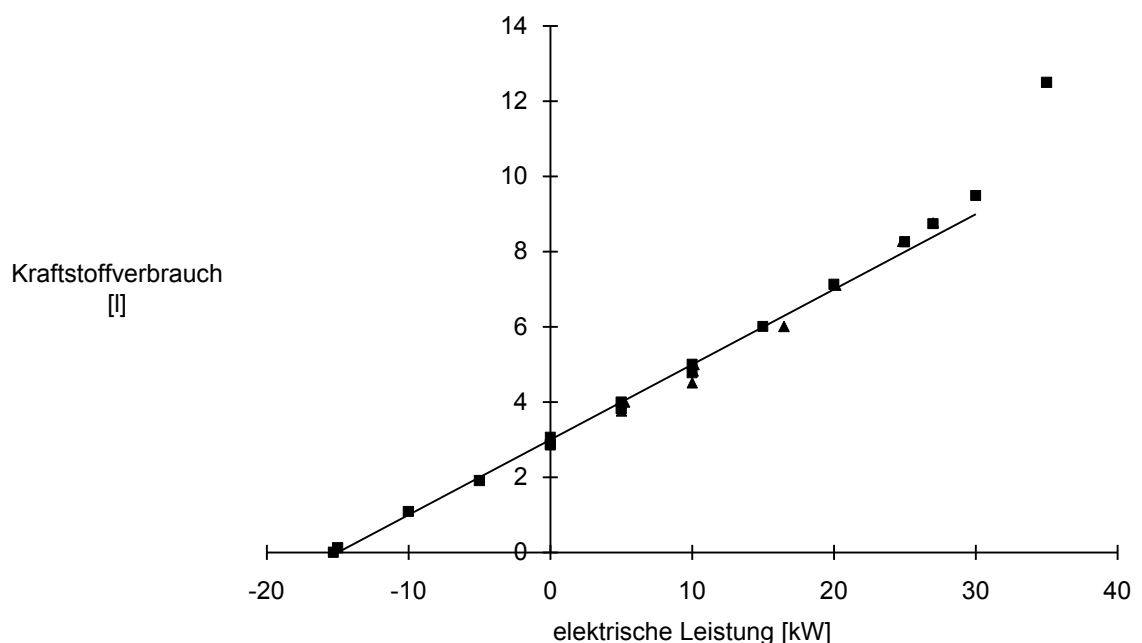


Abb. 2: Gemessener Kraftstoffverbrauch des Dieselgenerators

Fig 2: Measured fuel consumption of the diesel generator

Die vermessene Leistungskennlinie der Windenergieanlagen HSW 30 zeigt Abb. 3. Dargestellt sind 10-Minuten-Mittelwerte der Leistung. Die Messung der Windgeschwindigkeit erfolgte in einer Höhe von 20 m, die Nabenhöhe der Windenergieanlagen beträgt 22,4 m. Das Diagramm zeigt, daß die Begrenzung der Leistungsabgabe auf den Nennwert bei Erreichen der Nennwindgeschwindigkeit korrekt erfolgt.

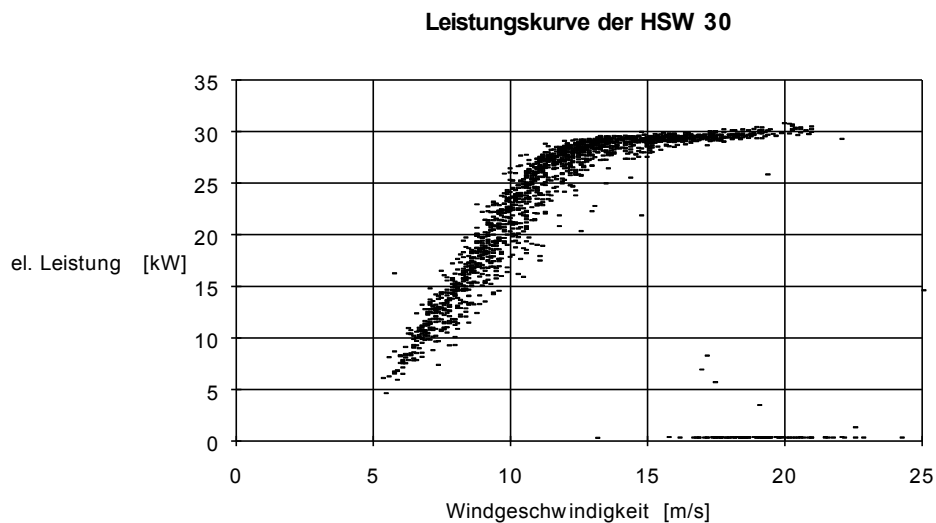


Abb. 3: Vermessene Leistungskennlinie der Windenergieanlage HSW 30 (10-Minuten-Mittelwerte). Die Messung der Windgeschwindigkeit erfolgte in einer Höhe von 20 m (Nabenhöhe 22,4 m)

Fig. 3: Measured power curves of the wind turbine HSW 30 (10-minute-average). The Wind speed was measured at a height of 20 m (wind turbine hub height 22.4 m)

Abb. 4 zeigt den parallelen Betrieb von Windenergieanlage und Dieselgenerator über einen zeitlichen Verlauf von fünf Minuten. Die Verbraucherlast wurde während dieser Zeit auf einen konstanten Wert von 30 kW eingestellt, die leichten Schwankungen im Lastverlauf sind auf Spannungs- und Frequenzschwankungen im Wind/Dieselnetz zurückzuführen. Als Verbraucherlast wurde die regelbare Wechselrichteranlage eingesetzt. Die Schwankung der Frequenz lag innerhalb eines Bereiches von 49 und 51 Hz. Der parallele Betrieb von Diesel, Windenergieanlage und Verbraucherlast funktionierte einwandfrei.

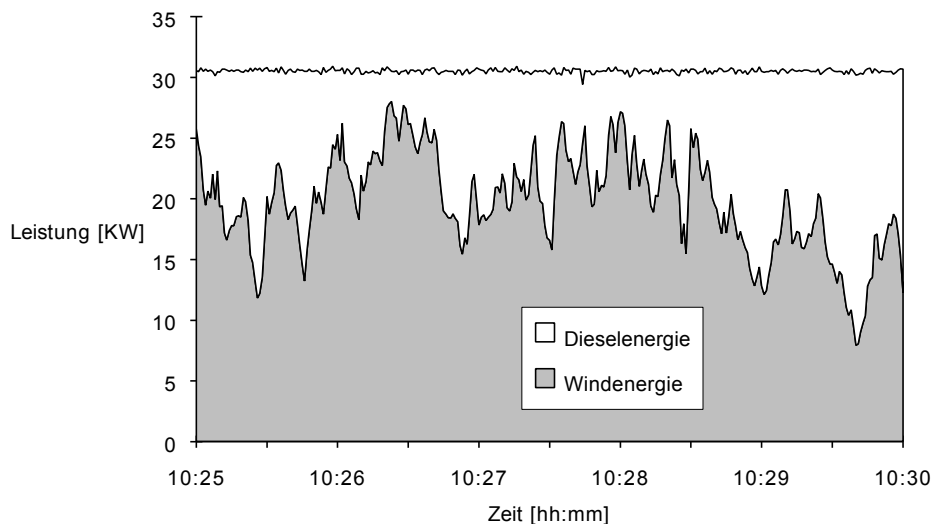


Abb. 4: Summe der elektrischen Leistung des Dieselgenerators (nichtschraffierter Anteil) und der Windenergieanlage (schraffierter Anteil) gemessen über einen Zeitraum von fünf Minuten bei einem konstantem Verbrauch von 30 kW.

Fig. 4: Summarized electric power output from the diesel generator and from the wind turbine (hatched portion) measured over a time periode of five minutes at a constant consumer load of 30 kW.