



Institut für Solare
Energieversorgungstechnik
Verein an der Universität
Gesamthochschule Kassel e.V.

M. Rothert
B. Kansteiner
M. Durstewitz

Wissenschaftliches Meß- und Evaluierungsprogramm (WMEP) zum Breitentest "250
MW Wind"
Jahresauswertung 1996

Stromversorgungskonzept für die Nordseeinsel Pellworm

Stromversorgungskonzept für die Nordseeinsel Pellworm

M. Rothert, B. Kansteiner, M. Durstewitz
Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET) e.V.
Königstor 59
D-34119 Kassel
tel. ++49 561 7294-106
fax. ++49 561 7294-100
email: mrothert@iset.uni-kassel.de

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen der Erstellung eines Konzeptes zur CO₂-freien Energieversorgung für die Insel Pellworm hat das ISET umfangreiche Untersuchungen zur autarken Stromversorgung durchgeführt.

Dabei konnte gezeigt werden, daß das Erzeugungspotential von Strom aus Sonne (PV) und überwiegend aus Wind die Nachfrage der Verbraucher im Mittel weit übersteigt. Allerdings ergeben sich im Jahresverlauf Zeiten, in denen die momentan erzeugte Leistung nicht ausreicht, den Bedarf zu decken (Windflauten). Diese Zeiten können durch Einspar- und Lastmanagementmaßnahmen deutlich verringert werden, in der verbleibenden Zeit können Speicher- und Back-up Systeme die Versorgung der Verbraucher zu wirtschaftlich vertretbaren Kosten sicherstellen.

Abstract

As part of the development of an overall CO₂-free energy concept for the German island Pellworm, ISET has carried out comprehensive investigations about the self-sufficient electricity supply.

It was shown that the median generation potential of sun (PV) and especially of wind energy greatly exceeds the demand. However, there are times during the year, when the momentary power produced is not sufficient to cover the demand (little wind). These periods can be shortened by saving energy and load management measures. During the remaining time energy storage systems are able to guarantee a constant power supply at reasonable costs.

1. Einleitung

Die Projektidee einer CO₂-freien Insel wurde 1993 von Ökologisch Wirtschaften e.V. (ÖW), Pellworm und mit Unterstützung der Schleswig in das ALTENER-Programm der EU eingebracht. Ziel von ALTENER ist die Verdopplung der Nutzung erneuerbarer Energien, die Verdreifachung der elektrischen Energie aus erneuerbaren Energien und die Sicherung eines Marktanteils von 5 % Biokraftstoffen im Verkehr zur wirksamen Reduktion der CO₂ Emissionen bis zum Jahr 2005.

Auf der Insel Pellworm gibt es bereits langjährige Erfahrungen mit erneuerbaren Energien, ab 1983 entstand in mehreren Phasen mit Unterstützung des BMBF und der EU das größte Photovoltaik-Wind-Hybridkraftwerk Europas (1 MW).

Das ISET untersuchte im Auftrag des Forums für Zukunftsenergien e.V., Bonn, insbesondere den Energie- und Leistungsbedarf für Strom auf Pellworm und das entsprechende Angebot durch vorhandene, bereits geplante und zukünftig installierbare Wind- und PV-Anlagen im Hinblick auf die Auslegung von Speicher- und Back-up-Systemen sowie Möglichkeiten des Lastmanagements zur möglichst autarken Stromversorgung der Insel. Das Angebot ist durch das vorherrschende Potential der Windenergie geprägt und kann durch die übrigen Energieträger wie Sonne und Biomasse nur unzureichend ergänzt werden, so daß der Energiespeicherung besondere Bedeutung zukommt.

2. Energienachfrage und –angebot

Energienachfrage: Zur Auslegung eines Energieversorgungssystems ist es in erster Linie wichtig, den Leistungs- und Energiebedarf eines Systems zu kennen. Dazu gehört der Jahresenergiebedarf ebenso wie die Tageslastganglinien und die Spitzenlast. Abb. 1 zeigt eine mittlere Tageslastganglinie (die mangels ausreichender Daten für jeden Tag des Jahres angenommen wird).

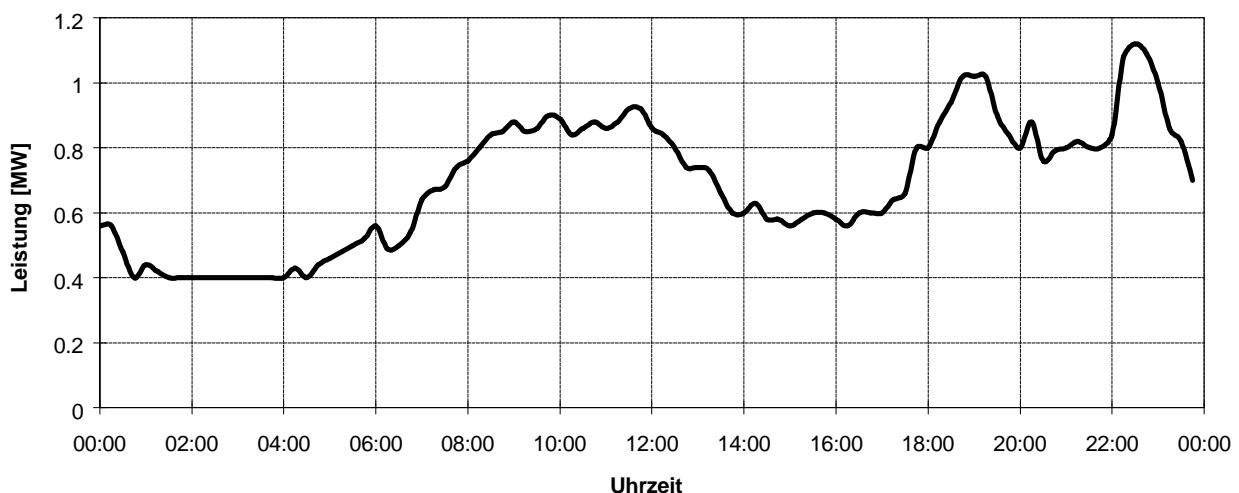


Abbildung 1: Lastganglinie für Pellworm

Unter Berücksichtigung eines Stromsparszenarios mit einem Jahresstromverbrauch von 3600 MWh (anstatt 5500 MWh für heute ohne Nachtspeicherheizungen) ergibt sich eine mittlere Jahresleistung von 0,41 MW bei einer Benutzungsdauer von 5000 h mit einer Jahreshöchstleistung von 0,72 MW.

Energieangebot: Pellworm verfügt über ein ausgezeichnetes Windregime, so daß dank bedeutender Weiterentwicklungen der modernen Windenergieanlagentechnik bei den derzeitigen Einspeisevergütungen ein wirtschaftlicher Betrieb der Anlagen erreicht wird. Im Rahmen des WMEP wird seit 1992 auf Pellworm eine Windmessung auf zehn Meter

Höhe über Grund sowie eine WEA-Leistungsmessung mit einem automatischen Datenerfassungsgerät (DEG) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 2 und 3 zusammengefaßt.

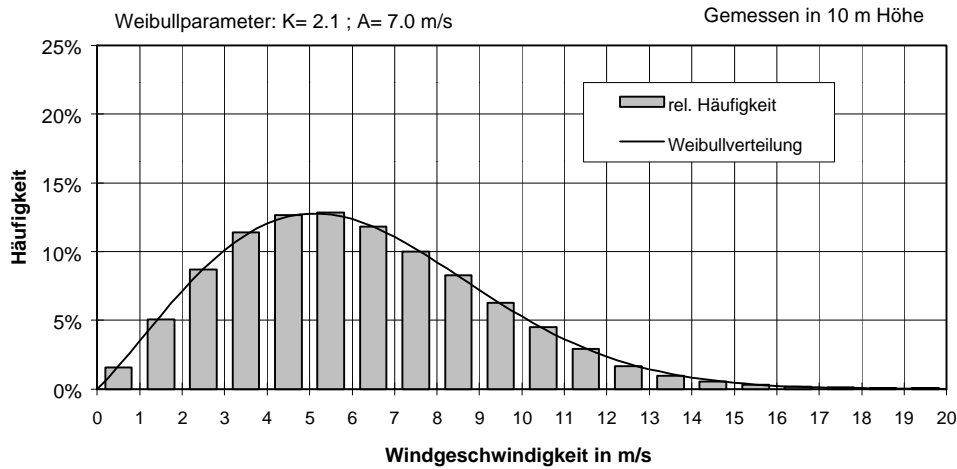


Abbildung 2: Häufigkeits- und Weibullverteilung der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe (1993 - 1996)

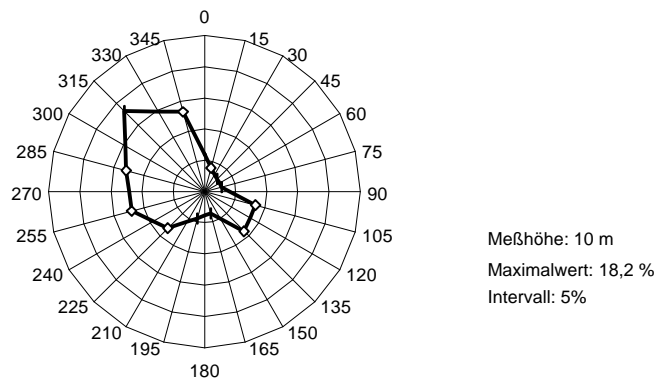


Abbildung 3: Richtungsverteilung der Windenergie (ISET-Meßstation; Zeitraum 1.1.1993 bis 31.12.1996)

Zur Zeit sind auf Pellworm acht WEA mit einer installierten Gesamtleistung von ca. 1,1 MW in Betrieb. Geplant ist die Installation von acht weiteren Anlagen des Typs „AN Bonus 600 kW / 44“, so daß sich die gesamte installierte Gesamtleistung von ca. 5,9 MW ergibt. Aus den Windmeßdaten errechnet sich dafür unter Berücksichtigung von Sicherheitsabschlägen eine Jahresarbeit aller WEA von ca. 15 GWh.

Obgleich auf Pellworm für Deutschland überdurchschnittlich gute Solarstrahlungsverhältnisse herrschen, kann die Photovoltaik in einer geplanten Ausbaustufe von 600 kW die Windenergie - besonders unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten - kaum ergänzen. Die prognostizierte mittlere Jahresarbeit beträgt ca. 500 MWh.

Neben der Wind- und Solarenergie stehen auf Pellworm noch begrenzte Vorräte an Biomassen zur Verfügung, z.B. einige Ackerflächen für den Anbau von Biomasse und die

Gülle aus der Viehhaltung. Für Biogas aus Gülle ergeben sich bei einem Grundlast-BHKW ca. 450 MWh_{el} und aus Rapsöl bei einem Spitzenlast-Rapsöl-Motor ca. 400 MWh_{el} mittlere Jahresarbeit [1].

Die Jahresenergieerträge zeigen, daß das Angebot erneuerbarer Energien auf Pellworm durch das hohe Potential an Windenergie geprägt ist und durch die übrigen Energieträger wie Solarstrahlung und Biomasse nur unzureichend ergänzt wird. Für das Leistungsangebot wird daher im folgenden nur die Windenergie betrachtet. Aus der hochgerechneten Leistungsdauerlinie einer WEA auf Pellworm ergibt sich, daß die mittlere verbrauchte Leistung von ca. 0,41 MW an ca. 6000 h im Jahr durch die WEA abgedeckt werden kann. Für eine genauere Betrachtung dieser Zeiten, besonders im Hinblick auf eine spätere Speicherdimensionierung, wurde eine Flautenauswertung aus den o.g. Wind- und Leistungsdaten vorgenommen. Eine Flaute ist so definiert, daß die abgegebene Leistung der WEA kleiner als die mittlere Last ist. Die Flautenauswertung für die Jahre 1993 - 1996 ergibt folgende Werte:

5,9 MW installierte Gesamtleistung	
Datenverfügbarkeit	98 %
gesamte Ausfallzeit	211 h
mittlere Gesamtflautendauer	2553 h/a
mittlere Anzahlzahl der Flauten	800
mittlere Flautendauer	3,2 h
längste Flaute	74 h

Tabelle 1: Eckwerte der Flautenauswertung

Die Aufteilung in Flautenklassen ist in Abb. 4 dargestellt.

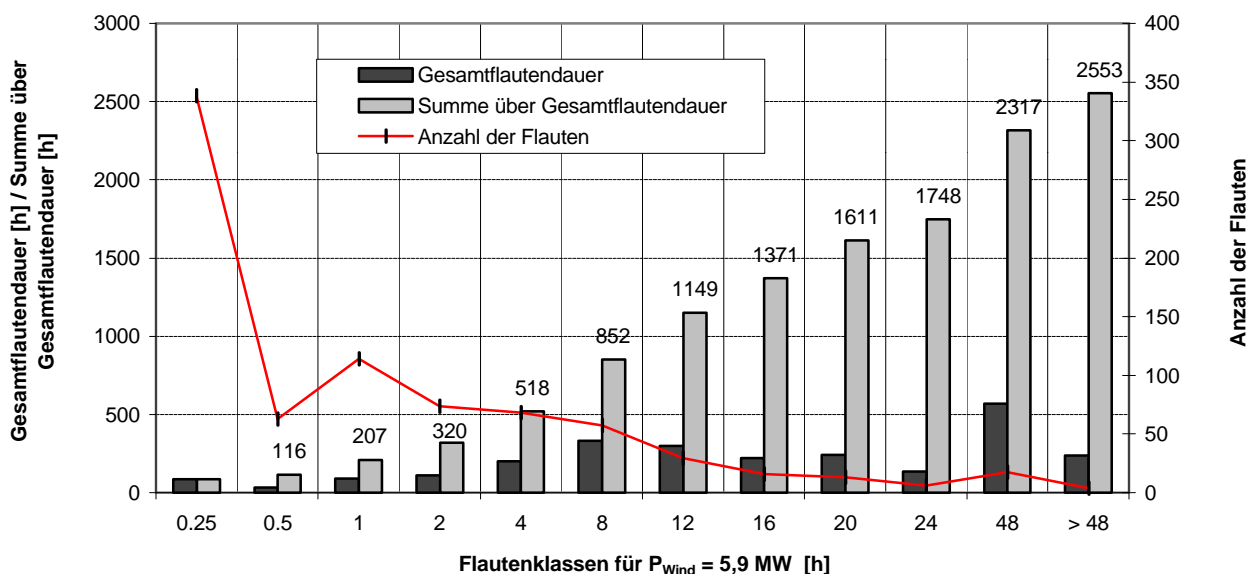


Abbildung 4: Flautenauswertung für 5,9 MW insgesamt installierter Windleistung

Die Flautenauswertung zeigt, daß trotz einer Jahresarbeit der WEA von ca. 15 GWh bei einem Jahresenergiebedarf von ca. 3,6 GWh während ca. 30 % des Jahres (2550 h) die Windleistung nicht ausreicht, den mittleren Bedarf der Last zu decken.

3. Ausgleich von Angebot und Nachfrage

Elektrische Versorgungssysteme verfügen im Gegensatz zu z.B. Gas- oder Fernwärmenetzen über keine nennenswerte Speicherkapazität. Um trotzdem einen stabilen Netzbetrieb zu gewährleisten, müssen Erzeugungs- und Verbraucherleistung jederzeit aneinander angepaßt werden. Da das Angebot von Wind, Solarstrahlung und Biomasse direkt an meteorologische und saisonale Schwankungen gekoppelt ist, und wenn überhaupt nur abgeregelt werden kann, besteht lediglich die Möglichkeit den Bedarf an das Angebot anzupassen oder die Energie zwischenspeichern. Mit Hilfe von Energiespargeräten und Lastmanagementkonzepten läßt sich der Bedarf reduzieren und bedingt verschieben. Die Schwankungen des Angebots sind aber nicht oder nur schwer vorhersehbar, so daß ein derartiges Management Aufwand und Flexibilität erfordert.

Die Energiespeicher lassen sich in netz- und lastseitige Speicher einteilen. Die lastseitigen Speicher (Kühl- und Heißwassergeräte) können mit dem oben genannten Lastmanagementsystem gesteuert werden und dadurch den Bedarf an zusätzlichen Speicherkapazitäten verringern. Auf der Netzseite sind systeminherent kaum Speicherkapazitäten vorhanden, lediglich Biomasse läßt sich in fester oder flüssiger Form sowie als Gas zwischenspeichern, bevor sie zur Stromerzeugung weiterverwendet wird. Ein mit Rapsöl betriebenes Verbrennungsaggregat ist deshalb als Back-up System zur Versorgung der Verbraucher bei längeren Windflauten besonders geeignet. Zur Speicherung des von den WEA erzeugten Stromes bieten sich verschiedene Speichersysteme an, die im folgenden beschrieben werden.

4. Speichersysteme

Für ein autarkes elektrisches Versorgungssystem für Pellworm sind elektrische Energiespeicher zwingend erforderlich. Für die Beurteilung dieser Speicher sind Kriterien wie Energiedichte, Dynamik, Systemwirkungsgrad, Kosten, Umweltverträglichkeit und technische Verfügbarkeit auf dem Markt wichtig. Tab. 2 gibt einen Überblick über mögliche Speichersysteme sowie deren Vor- und Nachteile.

Speichersysteme	Vorteile	Nachteile
Pumpspeicherkraftwerke	<ul style="list-style-type: none"> • technisch erprobt • hohe Lebensdauer und Zyklusfestigkeit • bei geeigneten geographischen Voraussetzungen sehr kostengünstig 	<ul style="list-style-type: none"> • verbraucherfern • nicht überall möglich
Elektrochemische Speicher: Bleibatterie Nickel/Cadmium-Batterie Nickel/Metallhydrid, usw.	<ul style="list-style-type: none"> • sehr weite Einsatzbereiche • mittlere Energiedichten • großtechnisch erprobt • kostengünstig • technisch jederzeit verfügbar • geringe Selbstentladung 	<ul style="list-style-type: none"> • kurze Lebensdauer nur 500 - 7000 Zyklen • begrenzte Leistungsdichte
Chemische Speicher Wasserstoff, Biomasse: z.B. Rapsöl, usw.	<ul style="list-style-type: none"> • sehr hohe Energiedichten, • kostengünstige Speicher • sehr geringe Selbstentladung 	<ul style="list-style-type: none"> • zum Teil hohe Kosten für Wandlungstechniken • geringer Systemwirkungsgrad • häufig aufwendige Infrastruktur
Schwungmassenspeicher (SMS)	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Leistungsdichte • mittlere Energiedichten • hohe Zyklusfestigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • große Einheiten mit hohen Energiedichten nicht kommerziell verfügbar • mittlere bis hohe Selbstentladung • Sicherheit
Doppelschichtkondensatoren Supercaps	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Leistungsdichte • lange Lebensdauer und Zyklusfestigkeit • wartungsfrei • hoher Wirkungsgrad 	<ul style="list-style-type: none"> • niedrige Energiedichte • große Einheiten noch nicht erprobt • große Kondensatoren bisher nicht kommerziell verfügbar
Supraleitende magnetische Energiespeicher (SMES)	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Leistungsdichte • lange Lebensdauer und hohe Zyklusfestigkeit • hoher Wirkungsgrad 	<ul style="list-style-type: none"> • geringe Energiedichte • großtechnisch nicht verfügbar • hoher Verbrauch der Nebenaggregate

Tabelle 2: Vergleich verschiedener Speichersysteme

Von den möglichen Speichersystemen sind für Pellworm vor allem Bleibatterien, Rapsöl und zukünftig vielleicht auch Wasserstoff geeignet und deshalb näher untersucht worden. Bleibatterien und Rapsöl sind zur Zeit die einzigen technisch-wirtschaftlichen Möglichkeiten, während Wasserstoff aufgrund seiner Vielseitigkeit (Einsatz auch zur Wärmeversorgung und im Verkehr möglich) in Zukunft eine interessante Alternative bietet. Dabei sind Bleibatterien sowohl für die Kurz- als auch für die Mittelzeitspeicherung geeignet und können so auch der Aufgabe der Netzregelung gerecht werden. Wasserstoff eignet sich vor allem als Mittel- und Langzeitspeicher (Wochen/Monate). Allerdings bietet sich für Pellworm als Langzeitspeicher aufgrund der heutigen technisch-wirtschaftlichen Möglichkeiten ein Rapsöl-Motor an. Raps kann auf Pellworm gut angebaut werden und auch die Weiterverarbeitung zum Rapsöl ist dort möglich. Aufgrund der hohen Energiedichte und der guten Speichereigenschaften ist es hervorragend als Langzeitspeicher geeignet.

5. Versorgungskonzept

Zur Auslegung und Optimierung eines Stromversorgungssystems für Pellworm wurde ein auf den Energieflüssen aller Komponenten basierendes Simulationsmodell entwickelt, da für die Auslegung der Speicher bislang nur die Windflautenauswertung berücksichtigt wurde. Den prinzipiellen Aufbau zeigt Abb. 5.

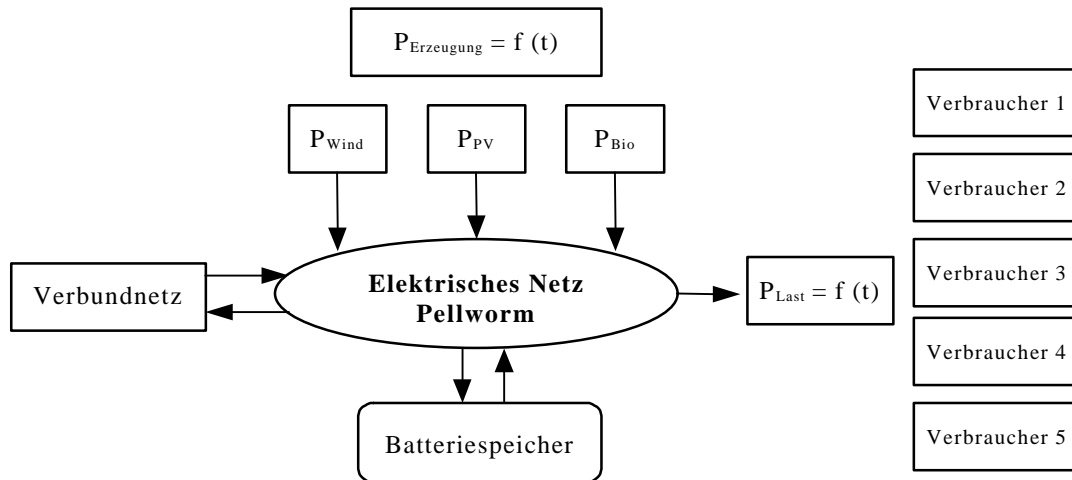


Abbildung 5: Aufbau des Simulationsmodells

Das wirtschaftliche Optimum mit den geringsten Stromgestehungskosten für die Energiespeicherung ergibt sich für den Einsatz eines Batteriespeichers zur Abdeckung von Flauten bis zu 4 Stunden und eines Rapsöl-Generators für die darüber hinausgehenden Zeiten. Die Ergebnisse für die Optimierungsrechnung sind in Abb. 6. dargestellt. Die dort angegebenen Kosten sind die mittleren Stromgestehungskosten für ein Speichersystem bestehend aus einer Batteriespeicheranlage kombiniert mit einem Rapsölmotor. Dieses System ist in der Lage während sämtlicher Windflauten die Stromversorgung auf Pellworm sicherzustellen.

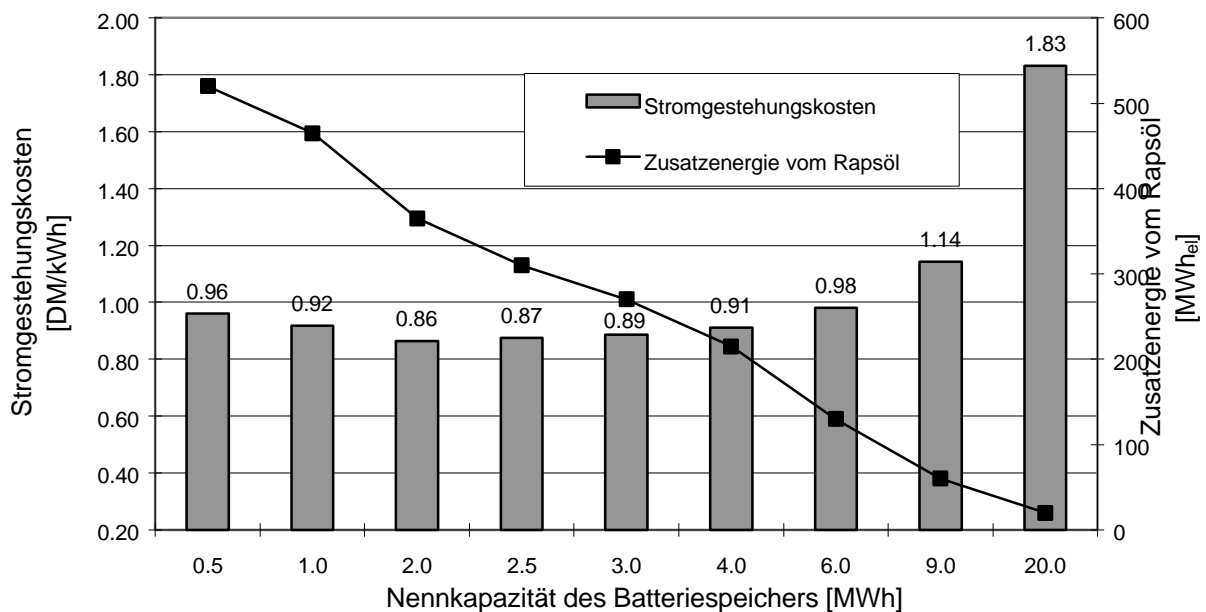
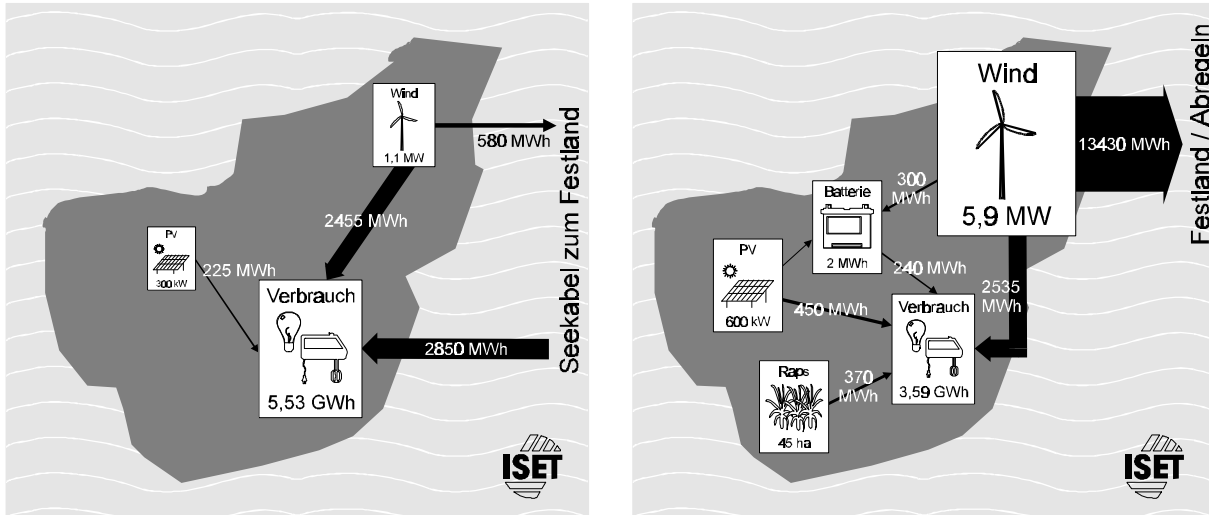


Abbildung 6: Stromgestehungskosten für ein Batterie – Rapsöl-Back-up System

Die Größen der Systemkomponenten und die Energiebilanzen von heute und für eine autarke Stromversorgung auf Basis des erarbeiteten Konzeptes sind in Abb. 7 dargestellt. Für das Konzept ergeben sich mittlere Stromgestehungskosten von ca. 28 Pf/kWh ohne Photovoltaik und 44 Pf/kWh unter Einbeziehung des Stroms aus PV-Anlagen [1].



heute: 26 % des Jahres autarke Stromversorgung

Konzept zur autarken Stromversorgung

Abbildung 7: Bilanz elektrischer Energie auf Pellworm

Literatur:

[1] Energieversorgung mit erneuerbaren Energien am Beispiel der Nordseeinsel Pellworm - Ein lokaler Entwicklungsplan -; ALTENER Programm No. 4.1030/Z/95-147; 1997