

Systemintegration dezentraler Energiewandlungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung regenerativer Energieträger

Thomas Woldt¹, Georg Gjardy², Sven Hildebrandt³, Holger Grünwald⁴, Oliver Stock⁴, B. Uwe Schneider⁴

¹ Lehrstuhl Energiewirtschaft

² Lehrstuhl Dezentrale Energiesysteme und Speichertechnik

³ Lehrstuhl Aufbereitungstechnik

⁴ Lehrstuhl Bodenschutz und Rekultivierung

Kurzfassung

Neben der Windenergie gewinnt die energetische Verwertung von Biomasse und biogener Abfall- und Nebenprodukte zunehmend an Bedeutung. Der Beitrag gibt einen Überblick über die Nutzung schnell wachsender Gehölze und industrieller biogener Abfall- und Nebenströme für die energetische Wandlung als zukunftsfähige Option. Möglichkeiten zur Energiewandlung mit Kraft-Wärme-Kopplung und zur systemkompatiblen Integration werden aufgezeigt.

Abstract

Alongside wind energy, the energetic utilization of biomass and bio-waste has come increasingly into focus. This paper outlines the use of fast growing tree species and industrial bio-waste for energetic conversion as a sustainable option. The possibilities for energetic conversion using cogeneration and for a system-compatible integration are also discussed.

Einleitung

Die allgemeine Energieversorgung muss sich langfristig an den Kriterien der Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit orientieren. Die Versorgungssicherheit wird häufig auf das Problem der potenziell verfügbaren Ressourcen reduziert und wesentliche Aspekte, wie beispielsweise eine unterbrechungsfreie Versorgung, bleiben unberücksichtigt. Wie entscheidend die Wirtschaftlichkeit sein kann, wurde den Menschen in Deutschland mit den steigenden Energiepreisen der letzten Jahre vor Augen geführt. Erstmals erleben wir in Deutschland die Situation, dass energieintensive Industriezweige ihre Produktionsstätten ins Ausland verlagern, weil dort die Elektroenergie preisgünstiger ist. Umweltpolitische Diskussionen fokussieren heutzutage stark auf dem anthropogenen Klimawandel. Insbesondere die Verstromung fossiler Energieträger wird mit ihren Kohlendioxidemissionen für die globale Erwärmung verantwortlich gemacht. Es gibt leider keinen technologischen „Königsweg“, der be-

schritten werden könnte, um allen Kriterien in gleichem Maße gerecht zu werden, sodass es auch in Zukunft auf das Zusammenspiel eines adäquaten Energieträgermixes ankommen wird.

In Ergänzung zu fossilen Energieträgern werden daher auch verstärkt regenerative Energiequellen genutzt, um den Endenergiebedarf zu decken. Beispielhaft sei auf den rasanten Ausbau der Windenergienutzung hingewiesen. Auch die energetische Verwertung von biogenen Energieträgern (z. B. Holz, Biogas) gewinnt an Bedeutung. Aufgrund ihrer natürlichen Dargebotsabhängigkeit erfordert eine Integration der erneuerbaren Energien entsprechend den Anforderungen des Versorgungssystems innovative Ansätze. Für Biomasse ist, aufgrund der geringen Energiedichte, ein Transport über weite Strecken häufig unwirtschaftlich, sodass eine dezentrale energetische Verwertung vor Ort sinnvoller ist und auch mit Blick auf die Erhaltungskosten von Netzen in ländlichen, schwach besiedelten Gebieten ökonomisch sinnvoll erscheint. In einem Versorgungssystem – dessen stabiler Betrieb von zeitgleicher Ausbalancierung von energetischem Bedarf und dessen Bereitstellung abhängt – werden sich auch die regenerativen Energieträger langfristig einem Regelkonzept unterwerfen müssen, welches unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Dargebotscharakteristiken eine den Systemerfordernissen entsprechende und marktorientierte Integration ermöglicht.

Langfristig gilt auch für die regenerativen Energieträger die Einhaltung des Effizienzkriteriums. Das bedeutet, dass neben der energetischen Verwertung mittels innovativer Verstromungstechnologien, die Biomassebereitstellung über Anbau, Ernte und Aufbereitung über kurz oder lang einer wirtschaftlichen und anlagentechnologischen Realisierbarkeit genügen muss. Ganzheitliche Lösungen zur Systemintegration neuer Energiewandlungstechnologien verlangen also die Untersuchung jeder Wertschöpfungsstufe bis hin zu Integrationskonzepten, welche eine systemkonforme Energiebereitstellung über die Versorgungsnetze ermöglichen. Im Rahmen dieses Beitrages werden ausgesuchte Aspekte einer energetischen Verwertung von Biomasse und Biogas aus industriellen Abfall- und Nebenprodukten vorgestellt und erörtert. Aufbauend auf dem Konzept des virtuellen Kraftwerks wird eine mögliche energetische Verwertung von Biomasse bzw. Biogas über Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen als Ergänzung zur Windenergieeinspeisung vorgestellt.

Thomas Woldt¹, Georg Gjardy², Sven Hildebrandt³,
Holger Grünewald⁴, Oliver Stock⁴, B. Uwe Schneider⁴

¹ Lehrstuhl Energiewirtschaft

² Lehrstuhl Dezentrale Energiesysteme und Speichertechnik

³ Lehrstuhl Aufbereitungstechnik

⁴ Lehrstuhl Bodenschutz und Rekultivierung

Erzeugung von Energieholz auf Landwirtschaftsflächen

Wie bereits erläutert, schränkt die niedrige Energiedichte nachwachsender Rohstoffe, aber auch die räumliche Verteilung der Anbauflächen die Möglichkeit der Energieversorgung auf überregionaler Ebene aufgrund der hohen Transportkosten erheblich ein. Die Bereitstellung und energetische Wandlung von Biomasse dürfte damit vor allem auf regionale und lokale Kontexte beschränkt bleiben. Durch die Einspeisung des erzeugten Stroms oder von biogenen Gasen in vorhandene Netzstrukturen eröffnen sich hierbei jedoch auch Möglichkeiten für zentrale Versorgungsansätze. Denkbar wäre in dezentralen Strukturen der Einsatz von Bioenergie als Beitrag zum Ausgleich von Schwankungen bei der Bereitstellung von Wind- oder Solarenergie. Bei all diesen Versorgungsansätzen muss die Bereitstellung der Bioenergieträger jedoch, ebenso wie alle anderen Teile der Wertschöpfungskette, den Kriterien der Nachhaltigkeit genügen. Die folgenden Abschnitte befassen sich vor diesem Hintergrund mit den Potenzialen einer Bereitstellung von Holzbiomasse aus neuartigen Landnutzungssystemen.

Aufgrund des begrenzten Potenzials in der Forstwirtschaft und Landschaftspflege sowie im Bereich der Rest- und Abfallhölzer (GRÜNEWALD et al., 2003) wird in letzter Zeit zunehmend der Anbau von Holz für die energetische und stoffliche Wandlung auf landwirtschaftlichen Flächen in Kurzumtriebsplantagen oder Agroforstsystemen diskutiert. Im Blickpunkt des Interesses stand dabei vor allem die Nutzung still gelegter Ackerflächen (HOFMANN, 2005).

Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen sollte geprüft werden, ob der Anbau schnell wachsender Gehölze für die energetische Wandlung auch eine zukunftsfähige Option für die Niederlausitz darstellt. Dies schließt die Frage ein, welche Baumarten am besten an die herrschenden klimatischen und edaphischen Verhältnisse angepasst sind. Hierbei ist besonders zu berücksichtigen, dass die Niederlausitz durch einen hohen Anteil an ertragsschwachen Standorten, darunter 77 000 ha in Bergbaufolgelandschaften (PFLUG, 1998), geprägt ist. Zudem haben klimatische Extreme mit sommerlichen Höchsttemperaturen in Kombination mit ausgeprägten Trockenperioden in den vergangenen Jahren zunehmend zu Ertragseinbußen oder gar -ausfällen in der landwirtschaftlichen Produktion geführt. Vor allem für diese Flächen wird intensiv nach Nutzungsalternativen gesucht, da sich hier das Spektrum anbauwürdiger Kulturen vor dem Hintergrund zurück gehender Subventionen weiter einschränken wird.

Es wurden zwei Standorte in der Bergbaufolgelandschaft ausgewählt, um Untersuchungen zur Produktivität schnell wachsender Baumarten durchzuführen. Die Untersuchungen umfassten den Vergleich verschiedener Pappel- und Weidenklone sowie der Robinie, die über einen Zeitraum von 10 Jahren mit unterschiedlichen Umtriebszeiten bewirtschaftet wurden. Eine umfassende Beschreibung der beiden Untersuchungsflächen, die mit Blick auf ihre Eigenschaften wesentliche Flächenpotenziale der Bergbaufolgelandschaft in der Niederlausitz repräsentieren, wurde bereits an anderer Stelle vorgenommen (BUNGART, 1999; GRÜNEWALD, 2005). Die vergleichende Untersuchung von unterschiedlichen schnell wachsenden Gehölzen auf diesen Standorten liefert belastbare Ergebnisse zur Mindestproduktion, die

selbst bei ungünstigsten Bodenbedingungen zu erzielen ist und die damit als gesicherte Information in die landwirtschaftliche Beratung einfließen kann.

Tab. 1 zeigt die maximal erreichten Ertragspotenziale für ausgewählte Baumarten und Klone. Die annuelle Produktivität weist mit Blick auf Baumart, Klon, Standort, Alter und Rotationsperiode eine große Schwankungsbreite auf. So erreichte der Weidenklon Zieverich auf einem mittel tonigen Sand nach 6 Jahren in der 1. Rotationsperiode eine Produktivität von 2,2 t Trockenmasse ha⁻¹ a⁻¹. Das höchste Ertragspotenzial wies die Robinie auf. Sie erreichte bei Anbau auf schwach schluffigem Sand in der 3. Rotationsperiode im Alter von 9 Jahren eine jährliche Produktivität von 9,5 t Trockenmasse ha⁻¹.

Tab. 1:

Ertragspotenzial verschiedener Klone der Pappel und Weide sowie der Robinie auf Kippenstandorten des Braunkohlebergbaus

Baumart/Klon	Bodenart	Alter (a)	Rotationsperiode	Ertrag (t ha ⁻¹ a ⁻¹)
Pappel				
Muhle Larsen	St3	7	1	3,9
Rap	St3	7	1	6,3
Beaupré	St3	7	1	6,6
Max 1	St3	7	1	3,5
Max 3	St3	10	1	4,1
Max 4	St3	7	1	3,1
Androscoggin	Su2	9	3	4,9
Hybride 275	Su2	9	2	5,7
Weide				
Zieverich	St3	6	1	2,2
Carmen	Su2	9	2	4,7
Robinie	Su2	9	3	9,5

Ein Vergleich zwischen den Erträgen unterschiedlicher Standorte ist aufgrund der variierenden Anbaubedingungen häufig schwierig. Grundsätzlich lässt sich jedoch feststellen, dass das Ertragspotenzial von Pappeln und Weiden auf Kippenflächen unter dem natürlich gewachsener Standorte liegt (HOFMANN-SCHIELLE et al., 1999). Dagegen kann die Robinie auch auf Kippenstandorten ähnliche Erträge erreichen wie auf natürlich gewachsenen Böden (BONGARTEN et al., 1992). Damit bietet der Anbau von Robinien zur Energieholzproduktion auch auf ertragsschwachen Standorten eine Option.

Aufgrund des bei angepasster Baumartenwahl möglichen Ertragspotenzials und der durch erste Modellberechnungen belegten Wirtschaftlichkeit (GRÜNEWALD et al., 2005) bietet der Anbau schnell wachsender Bäume eine belastbare Option für die Wiederherstellung der Einkommensfunktion marginaler Flächen. Mit Blick auf die benötigten Flächenpotenziale kann kurzfristig die Versorgung kleiner Anlagen für die dezentrale Erzeugung von Wärme und Strom oder die Teilversorgung mittlerer und größerer Anlagen realisiert werden.

Aufbereitung biogen beladener Neben- und Abfallströme

In vielen Bereichen der industriellen Verarbeitung von biogenen Rohstoffen fallen eine Reihe von Neben- und Abfallprodukten an. Neben den biogenen Feststoffen bilden auch flüssige Ströme mit biogenen Komponenten ein interessantes Ausgangsmaterial zur energetischen Verwertung. Bislang werden flüssige Neben- und Abfallströme industrieller Herkunft meist entsorgt oder unter hohem Kosten- und Energieaufwand separiert und aufgearbeitet (z. B. Nebenströme der Lebensmittelindustrie). Durch eine Verwertung dieser Neben- und Abfallströme lässt sich die Wirtschaftlichkeit der Produktionslinie erhöhen. Da die Entstehung dieser Ströme jedoch dezentral stattfindet und ein Transport wiederum Kosten erzeugt, ist eine dezentrale Verwertung anzustreben.

Vereinzelte wird bereits zur Verwertung flüssiger Ströme die anaerobe Vergärung genutzt (u. a. Industrien der Fischverarbeitung- sowie Zucker- und Hefeproduktion (REINMANN, 2003)). Hierbei kommt es zur Bildung von Biogas und zugleich zu einer Minderung der biogenen Beladung der eingeleiteten Ströme. Der Weg der anaeroben Vergärung läuft über eine Reaktionskette aus vier Einzelreaktionen ab (Hydrolyse → Versäuerung → Acetogenese → Methanogenese), welche im Prozess jedoch parallel zueinander ablaufen. Aus zahlreichen Literaturquellen (u. a. KUNST, 2005) ist bekannt, dass bei der Umsetzung komplexer Substrate (Proteine, Fette, Kohlenhydrate) die Hydrolyse der geschwindigkeitslimitierende Teilschritt ist und somit die gesamte Umsetzung des Ausgangssubstrates verlangsamt. Um die erforderliche Zeit für die Hydrolyse zu gewährleisten, ist ein entsprechend großes Biogasreaktorvolumen erforderlich. Ansonsten wird nur ein Teil des Substrates umgesetzt, wodurch die Biogasproduktion und die Belastung des Abwasserstromes negativ beeinflusst werden. Dieses Problem ist einer der Gründe weswegen Biogastechnologien in der industriellen Produktionskette nur vereinzelt ihren Einsatz finden.

Ansatzpunkt zur Verbesserung der Umsatzrate und -zeit ist die Gestaltung einer Hochleistungs-Hydrolyse-Einheit. Diese Einheit wird dem eigentlichen Biogasreaktor vorgeschaltet (Abb. 1). Das Zwischenprodukt (Hydrolysat) kann zentral wie auch dezentral erzeugt, zur Biogasgewinnung genutzt oder zu weiteren Produkten umgewandelt werden. Innerhalb dieser Hochleistungs-Hydrolyse-Einheit wird durch Immobilisation von Enzymen oder Anzucht von Enzymproduzenten eine hohe Konzentration in der Reaktoreinheit gewährleistet. Hierbei werden die Enzyme bzw. die Enzymproduzenten auf austauschbaren Elementen immobilisiert bzw. angesiedelt. Die hohe Enzymkonzentration führt zu einem schnelleren Abbau des Substrates, da die Abbaugeschwindigkeit mit steigender Substratkonzentration gegen einen Maximalwert strebt (STRYER, 1991; KUNST, 2005).

Durch eine Aufteilung der Hydrolyse-Einheit in verschiedene Unterstufen (Reaktor-Einheiten „RE“) zur Spaltung einzelner Substratklassen, kann das Milieu an die entsprechenden Enzymgruppen so angepasst werden, dass sich eine weitere Verbesserung der enzymatischen Katalyse einstellt. Zudem verhindert eine Aufteilung auch das Konkurrenzverhalten der Enzyme untereinander.

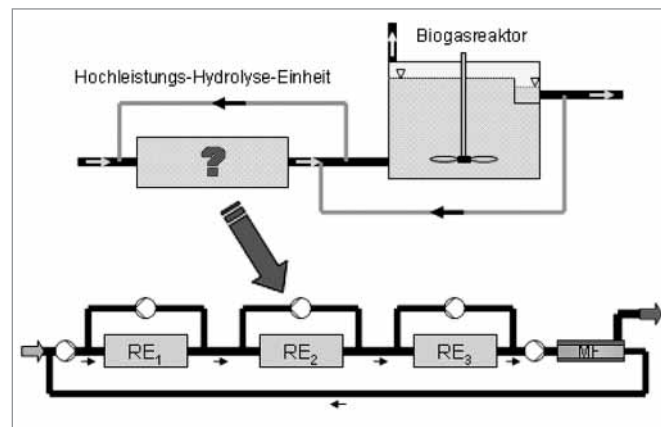


Abbildung 1:

Unterteilungsbeispiel einer Hochleistungs-Hydrolyse-Einheit in drei Unterstufen

Das aus dem Hydrolysat erzeugte Biogas lässt sich auf die gleiche Art und Weise energetisch verwerten wie es bei herkömmlichen Biogasanlagen ohne Vorschaltung einer Hochleistungs-Hydrolyse-Einheit üblich ist. Stand der Technik ist hierbei der Einsatz von BHKW auf Basis unterschiedlicher Verbrennungsmotoren (meist Gas-Otto- oder Zündstrahlverfahren), welche zur Erzeugung von elektrischer Energie mit einem Generator (Synchron- sowie Asynchrongeneratoren) gekoppelt werden. Der elektrische Wirkungsgrad dezentraler Anlagen liegt derzeit zwischen 30 und 40 % (FNR, 2005). Die Motorabwärme lässt sich unter anderem zur Beheizung des Biogasreaktors einsetzen. Für die Zukunft stellt die Wandlung des Biogases in Mikrogasturbinen eine viel versprechende Option dar.

Energetische Wandlung von biogenen Festbrennstoffen und Biogas

Eine effiziente energetische Verwertung von fester Biomasse sowie Biogas muss sowohl einer anlagentechnologischen Realisierbarkeit als auch wirtschaftlichen Anforderungen genügen. Die Technologien der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) bieten eine sinnvolle Alternative, da die geringe Brennstoffenergie über einen Koppelprozess in elektrische Energie und nutzbare Wärme gewandelt wird und somit eine bessere Ausnutzung des Energieträgers erfolgt. Damit lassen sich vergleichsweise hohe Gesamtanlagenwirkungsgrade erreichen.

Als Energiewandlungstechnologie wird der KWK ein erhebliches Potenzial zuerkannt, einen signifikanten Beitrag zur Erreichung der deutschen Effizienzsteigerungsziele zu leisten (vgl. KOALITIONSVERTRAG, 2005).

Die energetische Effizienz ist als einziges Kriterium jedoch nicht ausreichend, um einen verstärkten Zubau von dezentralen Biomasse-KWK-Anlagen zu rechtfertigen. Denn letztendlich ist und bleibt die Gesamtwirtschaftlichkeit über die Anlagennutzungsdauer der entscheidende Prüfstein. Neben der kostenoptimalen Gestaltung der Bereitstellungsprozesse für den Bioenergieträger, ist ein zeitgleicher Bedarf an thermischer und elektrischer Energie Grundvoraussetzung für das wirtschaftlich vertretbare Betreiben solcher Anlagen. Hohe Anla-

gennutzungsgrade sind möglich, wenn ganzjährig ein Warmwasser- bzw. Prozesswärmebedarf im Niedertemperaturbereich vorliegt. Eine Erweiterung der Nutzungsgrade lässt sich aber auch beispielsweise mit der Bereitstellung von Kälte für Gebäudeklimatisierung über Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung erreichen.

Für die energetische Verwertung von fester Biomasse werden schon KWK-Anlagen betrieben, die auf dem Organic Rankine Cycle Prozess (ORC) basieren. Im Unterschied zum Wasser-Dampf-Prozess wird ein organisches Arbeitsmedium (z. B. Silikonöl) als Wärmeträger verwendet. Der Vorteil liegt in den günstigen Verdampfungseigenschaften, sodass der Arbeitsprozess bei niedrigen Temperaturen und Drücken durchgeführt werden kann. Die erzeugte Wärme wird über einen Thermoölkessel an das Arbeitsmedium übertragen. Das verdampfte Silikonöl wird anschließend über eine langsam laufende Axialturbine entspannt. Die Turbine ist ohne Zwischengetriebe direkt mit dem Generator gekoppelt. Das entspannte Medium wird anschließend kondensiert und die freigesetzte Wärme lässt sich als Heiz- oder Prozesswärme verwenden.

Eine zukünftige Option auch Biogas in kleinen dezentralen Anlagen energetisch zu verwerten stellen aus heutiger Sicht Mikrogasturbinen dar. Es handelt sich hier um eine Technologie, deren Entwicklung zur stationären Energieversorgung Mitte der 90er Jahre in den USA begonnen hat. Die Anwendung von Mikrogasturbinen hat in Deutschland erst in den letzten Jahren begonnen und die Nutzbarkeit zur energetischen Wandlung von Biogas wird derzeit noch in Pilotprojekten untersucht. Die Vorteile gegenüber herkömmlichen Kolbenmaschinen liegen in der kompakten Bauweise, dem guten Teillastverhalten, der Wartungsfreundlichkeit und der relativ guten Anpassbarkeit an unterschiedliche Gasqualitäten (KRAUTKREMER, 2005).

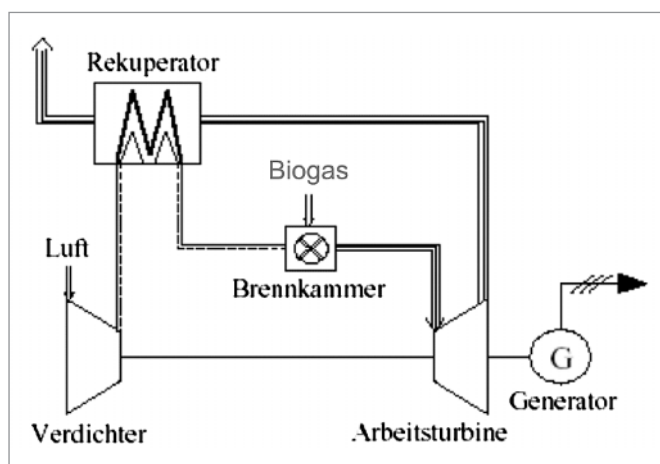


Abbildung 2:
Schematischer Mikrogasturbinenprozess

Die Funktionsweise des Mikrogasturbinenprozesses ist in Abb. 2 schematisch dargestellt. Die angesaugte Verbrennungsluft wird im Verdichter komprimiert und anschließend im Rekuperator durch die entgegenströmenden heißen Turbinenabgase vorgewärmt. Mit dem Eintritt in die Brennkammer wird die Verbrennungsluft mit dem Brennstoff vermischt und gezündet. Die heißen Verbrennungsgase

werden nach Verlassen der Brennkammer in einer schnell laufenden Turbine entspannt und treiben so den Verdichter und Generator an. Die Abgase werden danach über den Rekuperator geleitet und geben einen Teil der Wärme an die Verbrennungsluft ab. Abschließend lässt sich die Restwärme des Abgases über Wärmetauscher zu Heiz- oder Prozesswärmezwecken verwenden. Aufgrund der getriebelosen Kopplung von Turbine und Generator wird eine Wechselspannung erzeugt, die erst mit Hilfe entsprechender Leitungselektronik in eine netzkonforme Wechselspannung gewandelt wird.

Mit den beiden beschriebenen Technologien stehen grundsätzlich zukunftsfähige Optionen für die energetische Wandlung von fester Biomasse und Biogas zur Verfügung. Ein wirtschaftlicher Betrieb hängt wesentlich von der Verwertbarkeit der thermischen Energie ab und ist für jeden Einzelfall genau zu prüfen.

Systemintegration von erneuerbaren Energien

Eine besondere Herausforderung bei der Integration dezentraler Energieeinspeisungen stellt die Nutzung der Windenergie dar. In großer Anzahl und mit immer größeren Einspeiseleistungen sowie zum Teil weit entfernt von den Last- bzw. Verbrauchsschwerpunkten, führen der verstärkte Zubau und eine unkoordinierte Einspeisung, insbesondere der stark fluktuierenden Windenergie, zu einem steigenden Regelleistungsbedarf, zu Netzengpässen, zu Stabilitätsproblemen und zu weiteren technischen Problemen, die das Netz und seinen sicheren Betrieb gefährden können.

Ein Ziel ist es deshalb, unter Berücksichtigung neuer verfügbarer Technologien, existierender Netzstrukturen, einem erweiterten und angemessenen Einsatz von Kommunikation und verteilter Intelligenz die Einspeisung aus dezentralen Erzeugungsanlagen (z. B. BHKW, Mikrogasturbinen), insbesondere von Windenergieanlagen (WEA), mit den jeweiligen Charakteristiken trotz Prognoseunsicherheiten planbar und systemgerecht zu gestalten. Im Umfeld der liberalisierten Energiemärkte wird somit aus einer gegenwärtig unkoordinierten Einspeisung eine planbare, profilbasierte (fahrplanbasierte) Erzeugung, wodurch der Strom aus solchen Erzeugungsanlagen marktfähig wird und der energiewirtschaftliche Nutzen steigt. Dadurch ergeben sich für Anlagenbetreiber Möglichkeiten, über derzeitige Vergütungsmechanismen hinaus, vermarktbar Stromprodukte anzubieten. Zur Umsetzung wird ein entsprechendes Energiemanagement bzw. der Einsatz von virtuellen Kraftwerken erforderlich (BITSCH et al., 2004).

Mit virtuellen Kraftwerken sind verschiedene Regelmodi für die Erzeugungseinheiten möglich (Spitzenleistungsbegrenzung, Energieregulierung, Leistungsregelung, Regelleistungsbereitstellung usw.). Unterschiedliche Betriebsführungsstrategien bzw. Optimierungsziele können auf diese Weise umgesetzt werden. Durch die Nutzung entsprechender Energiemanagementsysteme können als Ergebnis einer kurzfristigen Einsatzplanung nach betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten Austauschfahrpläne erstellt werden, die schließlich die Basis für eine marktorientierte Betriebsführung darstellen. Zur optimalen Umsetzung wird zudem eine Koordination von dezentraler Erzeugung mit

dem entsprechenden Netzbetreiber notwendig. Dabei sind nicht nur Fahrpläne abzustimmen, sondern zusätzlich Systemdienstleistungen, die auch von dezentralen Erzeugungsanlagen bereitgestellt werden können zu berücksichtigen (Abb. 3). Darüber hinaus wird durch eine Kaskadierung von mehreren dezentralen Energiemanagementsystemen eine großflächigere Optimierung möglich. Des Weiteren ist bei virtuellen Kraftwerken eine netztopologische Clusterung nach Möglichkeit einer nicht netztopologischen Clusterung vorzuziehen, weil dadurch der Kommunikationsaufwand reduziert werden kann und die Koordination zwischen dezentraler Erzeugung und Netzbetreiber weniger aufwendig zu realisieren ist (GJARDY, 2006).

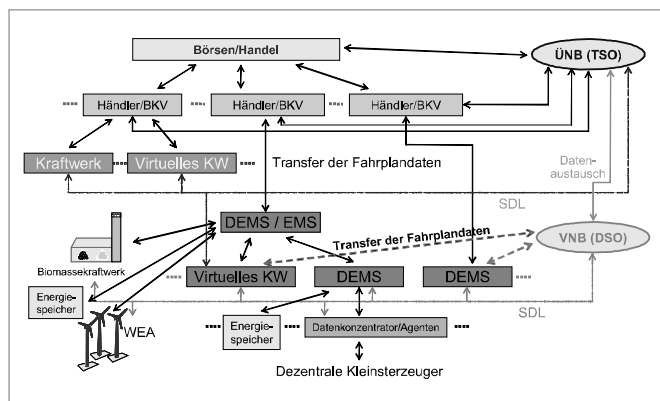


Abbildung 3:
Marktorientierte Betriebsführung und Systemintegration (GJARDY, 2006)

Um trotz Dargebotsabhängigkeit und Prognoseunsicherheiten möglichst viel Strom aus regenerativen Energiequellen gesichert am Strommarkt anbieten zu können, ist ein ausgewogener Energiemix mit möglichst vielen Regelungsmöglichkeiten auf der Erzeuger- und Lastseite sowie der Einsatz von Speichern anzustreben. Auf der Erzeugerseite können hierbei auch Biomasse- bzw. Biogas verwertende KWK-Anlagen bei entsprechend verfügbaren Regelbereichen herangezogen werden.

Letztlich wird es aber von den zukünftigen Rahmenbedingungen abhängig sein, wie virtuelle Kraftwerke betrieben werden, d. h. von welchen Akteuren und mit welchen Optimierungszielen. Um auch die Energie aus regenerativen Energiequellen zu nutzen, die nicht gesichert am Strommarkt angeboten oder aufgrund von Leitungsempfängen nicht vollständig eingespeist werden kann, sind zuschaltbare Lasten vor Ort, wie z. B. Elektrolyse mit nachgelagerter Wasserstoffwirtschaft denkbar. Ein langfristiges Ziel könnte es sein, vorwiegend nur eine gesicherte fahrplanbasierte Einspeisung ins Stromnetz vorzunehmen und den verbleibenden Rest anderen Sekundärenergiemärkten zuzuführen (GJARDY und BITSCH, 2006).

Zusammenfassung

Eine zukunftsfähige Energieversorgung sollte auf einem ausgewogenen Energieträgermix basieren. Die neuen Möglichkeiten zur energetischen Nutzung von fester Biomasse und Biogas werden das bestehen-

de Energieversorgungssystem um dezentrale Anlagen ebenso ergänzen, wie bereits die vielen bestehenden Anlagen zur Nutzung der Windenergie. Insbesondere der Kraft-Wärme-Kopplungstechnologie wird ein erhebliches Potenzial beigemessen, um zur wirtschaftlichen und energetisch effizienten Wandlung regenerativer Energieträger beizutragen. Die Erweiterung des Energieversorgungssystems um eine Vielzahl von dezentralen Anlagen erfordert innovative Ansätze. Neue Konzepte, wie die des virtuellen Kraftwerks bieten Lösungsmöglichkeiten für eine systemkompatible und an Wirtschaftlichkeitskriterien orientierte Integration solcher Anlagen.

Literatur

- BITSCH, R.; GJARDY, G.; WOLDT, T.; 2004:** Virtuelle große Kraftwerke – eine Möglichkeit zur netzverträglichen Einbindung dezentraler Energieerzeugungen. In: Forum der Forschung 17/2004: S. 25-30, BTU Cottbus, Eigenverlag.
- BONGARTEN, B. C.; HUBER, D. A.; APSLEY, D. K.; 1992:** Environmental and genetic influences on short-rotation biomass production of black locust (*Robinia pseudoacacia L.*) in the Georgia Piedmont. Forest Ecology and Management 55, 315-331.
- BUNGART, R.; 1999:** Erzeugung von Biomasse zur energetischen Nutzung durch den Anbau schnellwachsender Baumarten auf Kippsubstraten des Lausitzer Braunkohlereviere. Cottbuser Schriften zu Bodenschutz und Rekultivierung 7.
- FNR, 2005:** Ergebnisse des Biogas-Messprogramms, Hrsg. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow
- GJARDY, G.; 2006:** Beitrag zur zukünftigen marktorientierten Betriebsführung und Systemintegration großflächig verteilter dezentraler Erzeugungen mit besonderer Berücksichtigung der Windenergie, Shaker Verlag 2006
- GJARDY, G.; BITSCH, R.; 2006:** Marktorientierte Betriebsführung großflächig verteilter dezentraler Erzeugungen in VWEW-Fachtagung „Smart Grids – der Beitrag virtueller Kraftwerke zur nachhaltigen Energieversorgung“ 7. und 8. Juni 2006, Fulda
- GRÜNEWALD, H.; 2005:** Anbau schnellwachsender Gehölze für die energetische Verwertung in einem Alley-Cropping-System auf Kippsubstraten des Lausitzer Braunkohlereviere. Cottbuser Schriften zu Bodenschutz und Rekultivierung 28.
- GRÜNEWALD, H.; SCHNEIDER, B. U.; FÜNFELD, C.; BENS, O.; HÜTTL, R. F. UND SCHIEFERDECKER, B.; 2003:** Biomassestrategie in der Niederlausitz. Studie im Rahmen des EU-Projektes REKULA der IBA Fürst-Pückler-Land. 94 S.
- GRÜNEWALD, H.; PAPE, D.; SCHNEIDER, B. U.; MURACH, D.; KÄCHELE, H.; HÜTTL, R. F.; 2005:** Long-term perspectives of bio-energy production in energy plantations and agroforestry systems; In: Sjunnesson, L.; Carrasco, J. E.; Helm, P.; Grassi, A. (Hrsg.): 14th European Biomass Conference. Proceedings of the European Conference held in Paris 17-21 October 2005, ETA-Renewable Energies und WIP-Renewable Energies, 168-171.
- HOFMANN, M.; 2005:** Pappeln als nachwachsender Rohstoff auf Ackerstandorten – Kulturverfahren, Ökologie und Wachstum unter dem Aspekt der Sortenwahl. Schriften des Forschungsinstitutes für schnellwachsende Baumarten Hann. Münden 8.

Thomas Woldt¹, Georg Gjardy², Sven Hildebrandt³,
Holger Grünewald⁴, Oliver Stock⁴, B. Uwe Schneider⁴

¹ Lehrstuhl Energiewirtschaft

² Lehrstuhl Dezentrale Energiesysteme und Speichertechnik

³ Lehrstuhl Aufbereitungstechnik

⁴ Lehrstuhl Bodenschutz und Rekultivierung

HOFMANN-SCHIELLE, C.; JUG, A.; MAKESCHIN, F.; REHFUESS, K. E.;
1999: Short-rotation plantations of balsam poplars, aspen and wil-
lows on former arable land in the Federal Republic of Germany. I. Si-
te-growth relationships. Forest Ecology and Management 121, 41-55.

KOALITIONSVERTRAG 2005: Gemeinsam für Deutschland. Mit Mut
und Menschlichkeit. Koalitionsvertrag von CDU, CSU und SPD 11.
November 2005.

KRAUTKREMER, B.: VDI Wissensforum – Biogas Energieträger der
Zukunft/VDI-Berichte 1872, Düsseldorf 2005

KUNST, S.; 2005: Mikrobiologische Grundlagen. In: Böhmke, B.
(Hrsg.): Anaerobtechnik, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 23-45

PFLUG, W. (HRSG.); 1998: Braunkohletagebau und Rekultivierung.
Landschaftsökologie, Folgenutzung, Naturschutz. Springer, Berlin.

REINMANN, I.; 2003: Thermophile Behandlungsverfahren zur biolo-
gischen Reinigung fetthaltiger Abwässer, VDI Verlag, Düsseldorf

STRYER, L.; 1991: Biochemie, Spektrum Akademischer Verlag, Hei-
delber/Berlin/New York, 185-324



Dipl.-Ing. Thomas Woldt, Jahrgang 1977, 1997-
2003 Studium des Wirtschaftsingenieurwesens mit
Schwerpunkt Energieversorgung an der BTU Cott-
bus, bis Ende 2005 wissenschaftlicher Mitarbeiter
am Lehrstuhl Dezentrale Energiesysteme und Spei-
chertechnik (Prof. Dr.-Ing. R. Bitsch), seit Januar
2006 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl
Energiewirtschaft der BTU Cottbus (Prof. Dr. W.
Fichtner) mit Forschungsschwerpunkt energiewirt-
schaftlicher Bewertung dezentraler Energiesyste-
me und Effizienzsteigerung durch verbrauchsnahe
Energieeinsatzoptimierung.



Dr.-Ing. Georg Gjardy, Jahrgang 1976, Studium
der Elektrotechnik mit den Schwerpunkten Auto-
matisierungs-, Kommunikations- und Energietechnik
an der BTU Cottbus, seit 2002 wissenschaft-
licher Mitarbeiter am Lehrstuhl Dezentrale Energie-
systeme und Speichertechnik (Prof. Dr.-Ing. R.
Bitsch) mit den Forschungsschwerpunkten Dezen-
trales Energiemanagement, Virtuelle Kraftwerke,
Systemintegration und Betriebsführung dezentraler
Erzeugungen.



Dipl.-Ing. Sven Hildebrandt, Jahrgang 1977, 1997-
2003 Studium des Umweltingenieurwesens und der
Verfahrenstechnik an der BTU Cottbus mit Vertiefung
in Prozess- und Anlagentechnik sowie in allge-
meiner Verfahrenstechnik, seit 2004 wissenschaft-
licher Mitarbeiter am Lehrstuhl Aufbereitungstech-
nik (Prof. Dr.-Ing. P. Ay) der BTU Cottbus mit dem
Forschungsschwerpunkt im Bereich der energeti-
schen und stofflichen Nutzung nachwachsender
Rohstoffe.



Dr.-Ing. Holger Grünewald, Jahrgang 1971, Studi-
um des Umweltingenieurwesens und der Verfahrenstechnik
mit Schwerpunkt Bodenschutz an der BTU
Cottbus, seit 1998 wissenschaftlicher Mitarbeiter
am Lehrstuhl Bodenschutz und Rekultivierung der
BTU Cottbus (Prof. Dr. Dr. h.c. R.F. Hüttl), in der Ar-
beitsgruppe Bioenergie (Dr. B.U. Schneider) zustän-
dig für den Forschungsschwerpunkt Bereitstellung
von Biomasse aus neuartigen Landnutzungssystemen
(Kurzumtriebsplantagen, Agroforstsysteme).



Dr. Oliver Stock, Jahrgang 1970, Studium der Ge-
ographie an der Universität Potsdam, seit 2001 wis-
senschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Boden-
schutz und Rekultivierung der BTU Cottbus (Prof.
Dr. Dr. h.c. R.F. Hüttl) mit Forschungsschwerpunkt
Rekultivierung von Bergbaufolgelandschaften, davor
wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Geo-
physik und Geologie der Universität Leipzig und am
Institut für Geoökologie der Universität Potsdam.



Dr. rer. nat. Bernd Uwe Schneider, Diplom-Forst-
wirt; 1957 in Siegen/Westfalen geboren; 1978-
1984 Studium der Forstwissenschaften an der Ge-
org-Ludwig-August Universität Göttingen; 1984-
1990 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl
für Bodenkunde und Bodengeographie der Univer-
sität Bayreuth; 1990 Promotion zum Thema "Wachs-
tum und Ernährung von Feinwurzeln in unter-
schiedlich immissionsbelasteten Fichtenbeständen
des Fichtelgebirges". 1990-1994 Forstberater bei
der Deutschen Gesellschaft für Technische Zu-
sammenarbeit GTZ mbH in Guatemala und Hondu-
ras. Ab 01.01.1995 Wissenschaftlicher Mitarbeiter
am Lehrstuhl Bodenschutz und Rekultivierung der
BTU Cottbus u. a. als Leiter der Arbeitsgruppen
Nachwachsende Rohstoffe/Landnutzungssysteme
und Bodenbiologie sowie als Koordinator von EU-
Projekten des Lehrstuhls.