

Potenziale der Elektrizitätserzeugung aus erneuerbaren Ressourcen im Freistaat Sachsen

Hannes Hobbie, Vera Schippers, Michael Zipf, Dominik Möst



Eine Analyse im Rahmen des Projektes „Energiewende Sachsen im transnationalen Kontext“, gefördert aus Mitteln des *Europäischen Sozialfonds* sowie des *Freistaates Sachsen*.

Impressum

Herausgeber

Technische Universität Dresden
Fakultät Wirtschaftswissenschaften
Lehrstuhl für Energiewirtschaft
01062 Dresden

Tel.: +49 351 463-33297
Fax: +49 351 463-39763
E-Mail: ee2@mailbox.tu-dresden.de
Internet <http://www.ee2.biz>

ISBN 978-3-86780-445-5

Stand 10/2014

Alle Rechte sind vorbehalten.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
2 Technische Potenziale und Ableitung Kostenpotenzialkurven	4
3 Berechnung von Stromgestehungskosten	5
4 Windenergie	6
4.1 GIS-gestützte Ermittlung und Analyse von Freiflächen	6
4.2 Energiewandlung	8
4.2.1 Zusammenhang von elektrischer Leistung und Windgeschwindigkeit	8
4.2.2 Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe	8
4.2.3 Berechnung der Jahresenergieerträge	8
4.3 Technische und wirtschaftliche Parameter	10
4.4 Ergebnisse	11
4.4.1 Kostenpotenzialkurven Sachsen	11
4.4.2 Wirtschaftliches Potenzial auf Stadt- und Landkreis-Ebene	13
4.4.3 Wirtschaftliches Potenzial auf Gemeinde-Ebene	13
4.5 Sensitivierung der Ergebnisse	15
4.5.1 Erweiterung der Mindestabstände zur Wohnbebauung	15
4.5.2 Wirtschaftliches Potenzial bei einer installierten Leistung von 3 MW je Turbine	17
5 Photovoltaik	21
5.1 GIS-gestützte Ermittlung und Analyse von Freiflächen	21
5.2 Energiewandlung	21
5.3 Technische und wirtschaftliche Parameter	22
5.4 Ergebnisse	23
5.4.1 Kostenpotenzialkurven Sachsen	23
5.4.2 Jahresenergieerträge und Stromgestehungskosten auf Stadt- und Landkreis-Ebene	26
5.4.3 Jahresenergieerträge und Stromgestehungskosten auf Gemeinde-Ebene	27
6 Landwirtschaftliche Biomasse	29
6.1 Theoretisches und technisches Potenzial an Biogas im Freistaat Sachsen	30
6.1.1 Biogasproduktion aus Tierexkrementen	30
6.1.2 Biogasproduktion aus Dauergrünland	31
6.1.3 Biogasproduktion aus Getreide- und Rapsstroh	33

6.1.4	Biogasproduktion aus Anbaukulturen auf Ackerflächen.....	35
6.2	Theoretisches und technisches Potenzial an Biokraftstoffen im Freistaat Sachsen	39
6.2.1	Produktion von Biodiesel aus Rapskulturen.....	39
6.2.2	Produktion von Bioethanol aus Getreidekulturen	40
6.2.3	Produktion von synthetischen Kraftstoffen aus Getreide- und Rapsstroh.....	40
6.3	Ergebnisse: Technisches Potenzial an Biogas und Biokraftstoffen im Freistaat Sachsen (Zusammenfassende Darstellung).....	42
6.4	Gestehungskosten von elektrischem Strom aus BHKW's mit Biogasverbrennung	45
6.4.1	Typische Anlagenkonfigurationen in Sachsen	45
6.4.2	Spezifische Investitionen für typische Anlagengrößen	46
6.4.3	Jährliche Gesamtausgaben für den Substrateinsatz	46
6.4.4	Jährliche Ausgaben für sonstige betriebs- und investitionsabhängige Kosten.....	48
6.4.5	Stromgestehungskosten von typischen Anlagenkonfigurationen in Sachsen.....	49
7	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	51
	Literaturverzeichnis.....	53
	Anhang	58

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Abgrenzung des Potenzialbegriffes.....	2
Abbildung 2.1:	Ableitung von Kostenpotenzialkurven.....	4
Abbildung 4.1:	Verschneidung von Landnutzung, Schutzgebieten und extremen Hanglagen.....	7
Abbildung 4.2:	Kostenpotenzialkurven Windenergie.....	11
Abbildung 4.3:	Wirtschaftliches Potenzial auf Landkreis- und Stadt-Ebene.....	13
Abbildung 4.4:	Wirtschaftliches Potenzial und Gestehungskosten auf Gemeinde-Ebene.....	14
Abbildung 4.5:	Kostenpotenzialkurven Windenergie (Mindestabstand 1000 sowie 2000 Meter).....	16
Abbildung 4.6:	Ertragszunahme bei Erhöhung der Anlagenleistung auf 3 MW (Szenario Basis min).....	18
Abbildung 4.7:	Häufigkeitsverteilung mittlere Windgeschwindigkeiten im Basis-Szenario.....	19
Abbildung 5.1:	Einstrahlungsrichtung der Direktstrahlung auf eine beliebig orientierte Fläche A.....	22
Abbildung 5.2:	Kostenpotenzialkurven Photovoltaik.....	23
Abbildung 5.3:	Technisches Potenzial auf Landkreis- und Stadt-Ebene.....	26
Abbildung 5.4:	Jahresenergieerträge und Gestehungskosten auf Gemeinde-Ebene.....	27
Abbildung 5.5:	Jahresenergieerträge Gemeinde-Ebene.....	28
Abbildung 6.1:	Nutzungspfade landwirtschaftlicher Biomasse in den Sektoren Elektrizität und Mobilität.....	29
Abbildung 6.2:	Technisches Potenzial an Biogas aus Rinder- und Schweineexkrementen auf Landkreis-Ebene.....	31
Abbildung 6.3:	Technisches Potenzial an Biogas aus Dauergrünland auf Landkreis-Ebene.....	33
Abbildung 6.4:	Technisches Potenzial an Biogas aus Getreide- und Rapsstroh auf Landkreis-Ebene.....	35
Abbildung 6.5:	Mengenverteilung von Anbaukulturen im Freistaat Sachsen.....	35
Abbildung 6.6:	Technisches Potenzial an Biogas aus Getreide und Pflanzen zur Grünernte auf Landkreis-Ebene.....	38
Abbildung 6.7:	Technisches Potenzial an Biogas und Biokraftstoffen in Sachsen (Berechnungssystematik).....	42
Abbildung 6.8:	Technisches Potenzial an Biogas im Freistaat Sachsen.....	44
Abbildung 6.9:	Installierte elektrische Leistung von BHKW's in Sachsen nach Leistungsklassen...	45
Abbildung 6.10:	Großhandelspreise für Weizen, Mais, Stroh und Heu im Zeitraum Juni 2011 bis September 2013.....	47

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Szenarien Wind (Überblick).....	5
Tabelle 2.2:	Szenarien PV (Überblick)	5
Tabelle 4.1:	Kategorien geeigneter Arten der Landnutzung für Windenergie sowie Rauhigkeitslängen	6
Tabelle 4.2:	Technische und wirtschaftliche Parameter Windenergie	10
Tabelle 4.3:	Großes wirtschaftliches Potenzial in Kombination mit geringen Gestehungskosten auf Gemeinde-Ebene	15
Tabelle 4.4:	Wirtschaftliches Potenzial bei Mindestabstand von 2000 m und 500 m.....	17
Tabelle 4.5:	Wirtschaft. und techn. Potenzial bei 1000 m Mindestabstand sowie 2,3 MW und 3 MW installierter Leistung.....	17
Tabelle 5.1:	Technische und wirtschaftliche Parameter Photovoltaik.....	23
Tabelle 5.2:	Wirtschaftliche und technische Potenziale für Photovoltaiksysteme in Sachsen.....	24
Tabelle 5.3:	Größtes technisches Potenzial und geringste Gestehungskosten auf Gemeinde-Ebene.	28
Tabelle 6.1:	Technisches Potenzial an Biogas aus Rinder- und Schweineexkrementen auf Landes-Ebene	31
Tabelle 6.2:	Theoretisches und technisches Potenzial an Biogas und Festbrennstoff aus Dauergrünlandflächen auf Landes-Ebene	32
Tabelle 6.3:	Theoretisches und technisches Potenzial an Biogas und Festbrennstoff aus Getreide- und Rapsstroh auf Landes-Ebene	34
Tabelle 6.4:	Überschussmengen an Getreiden und Pflanzen zur Grünernte auf Landes-Ebene	37
Tabelle 6.5:	Theoretisches und technisches Potenzial an Biogas aus Getreide- und Grünernte auf Landes-Ebene	37
Tabelle 6.6:	Theoretisches und technisches Potenzial an Biodiesel aus Rapskulturen auf Landes-Ebene	39
Tabelle 6.7:	Theoretisches und technisches Potenzial an Bioethanol aus Getreidekulturen auf Landes-Ebene	40
Tabelle 6.8:	Theoretisches und technisches Potenzial an BtL-Kraftstoff aus Getreide- und Rapsstroh auf Landes-Ebene	41
Tabelle 6.9:	Technisches Potenzial an Biogas und Biokraftstoffen in Sachsen	43
Tabelle 6.10:	Technisches Potenzial an Biogas und Biokraftstoffen in Sachsen	46
Tabelle 6.11:	Mittlere Großhandelspreise für Weizen, Mais, Stroh und Heu im Zeitraum Juni 2011 bis September 2013	48
Tabelle 6.12:	Sonstige betriebs- und investitionsabhängige Ausgaben.....	48
Tabelle 6.13:	Stromgestehungskosten typischer Anlagenkonfigurationen von Biogasanlagen in Sachsen	49

Tabelle A.1: Technisches und wirtschaftliches Potenzial an Windenergie auf Stadt- und Landkreis-Ebene.....	58
Tabelle A.2: Technisches und wirtschaftliches Potenzial an Photovoltaik auf Stadt- und Landkreis-Ebene.....	59
Tabelle A.3: Technisches Potenzial an Biogas auf Stadt- und Landkreis-Ebene.....	60

1 Einleitung

In den letzten zehn Jahren hat der Anteil erneuerbarer Ressourcen an der Stromerzeugung in Deutschland stark zugenommen und erreichte ca. 23% im Jahr 2012¹. Dieser Anteil soll in den nächsten Jahren kontinuierlich weiter erhöht werden und soll mindestens 35% bis zum Jahr 2020, 50% in 2030 und 80% in 2050 betragen (siehe hierzu § 1 Abs. 2 EEG). Hierbei stellt sich die Frage, welche Technologien zukünftig welchen Beitrag leisten können. Eine wichtige Grundlage für die Beantwortung der Frage können regionale Potenzialanalysen für die Nutzung erneuerbarer Ressourcen zur Stromerzeugung sein. Diese kann fundierte Informationen bzw. Daten zum vorhandenen Potenzial erneuerbarer Energien bereitstellen und dient insbesondere der Unterstützung lokaler und regionaler Energie- und Klimaschutzkonzepte, kann aber ebenso bei der Abstimmung der Ausbaupfade der Bundesländer helfen.

Am Lehrstuhl für Energiewirtschaft der TU Dresden wurden die Potenziale für die Technologien Windenergie und Photovoltaik (PV) auf Dachflächen² sowie den Energieträger Biomasse auf regionaler Basis mithilfe eines Geoinformationssystems (GIS) ermittelt. Unter dem Begriff Potenzial können unterschiedliche Ausprägungen verstanden werden, so dass zuerst eine Definition des Begriffes gegeben wird (siehe auch Abb. 1.1). Häufig wird bei Potenzialen zwischen theoretischem, technischen, wirtschaftlichen und erschließbaren Potenzialen unterschieden (vgl. Kaltschmitt u. Hartmann 2001). Das *theoretische Potenzial* beschreibt das in einer Region (meist ein Land) innerhalb eines Zeitraumes (meist ein Jahr) nutzbare physikalische Energieangebot. Beispielsweise wird bei der Ermittlung des theoretischen Potenzials der Sonnenenergie die Größe des Landes mit der durchschnittlichen Sonneneinstrahlung pro Quadratmeter und Jahr multipliziert. Da sich das Energieangebot vieler erneuerbarer Energiequellen zeitlich stark verändert, wird häufig auf ein langjähriges Mittel abgestellt (z. B. die mittlere Windgeschwindigkeit). Dieses Potenzial markiert die absolute Obergrenze und vernachlässigt technische, wirtschaftliche und strukturelle sowie administrative Restriktionen. Aufgrund der starken Überschätzung des tatsächlich nutzbaren Potenzials und der geringen praktischen Relevanz wird das theoretische Potenzial in dieser Arbeit nicht behandelt. Das *technische Potenzial* bezieht im Gegensatz zum theoretischen Potenzial technische, strukturelle und ökologische Restriktionen mit ein. Dazu gehören beispielsweise verfügbare Umwandlungstechnologien, -effizienzen oder Flächenverfügbarkeiten. Im Falle der Windenergie werden u.a. Standorte, regionale Windgeschwindigkeiten und entsprechende Turbinentypen berücksichtigt. Das technische Potenzial wird insbesondere durch den technischen Fortschritt, aber auch durch administrative Rahmenbedingungen stark beeinflusst. Technologische Weiterentwicklungen erweitern das technische Potenzial, wohingegen administrative (z. B. genehmigungsrechtliche oder sozio-kulturelle) Beschränkungen es im Zeitablauf tendenziell begrenzen. Das Potenzial beschreibt daher den aus technischer Sicht (unter Berücksichtigung der derzeitigen bzw. zukünftigen technischen Möglichkeiten) maximal möglichen Beitrag einer erneuerbaren Ressource zur Elektrizitätsbereitstellung. Das *wirtschaftliche Potenzial* wird von den alternativen Bereitstellungsoptionen sowie den mit der Technologie zur Nutzung des erneuerbaren Energieträgers verbundenen ökonomischen Parametern

¹ Hierzu hat maßgeblich das Erneuerbare-Energien-Gesetz beigetragen, welches als zentralen Bestandteil Investoren eine hohe Planungssicherheit durch fixe Vergütungssätze für eine Dauer von 20 Jahren ermöglicht hat.

² Freiflächenanlagen sind in der Analyse nicht berücksichtigt. In 2012 und 2013 wurden nur weniger Freiflächenanlagen als in den Jahren 2009 bis 2011 errichtet (Analyse der EEG-Anlagenstammdaten), da die Einspeisevergütung im EEG im Zuge der Photovoltaiknovelle Ende Juni 2012 stark abgesenkt wurde. Aufgrund der politischen Diskussion zur Nutzung von PV auf Freiflächen ist davon auszugehen, dass Freiflächenanlagen auch zukünftig nicht mehr die Bedeutung beim Ausbau der Photovoltaik haben werden. Unten den gegenwärtigen Rahmenbedingungen, insbesondere den hohen Arbeitspreisen für Strom (u.a. bedingt durch die Umlage der Netzentgelte und EEG-Umlagekosten auf den Arbeitspreis), wird der Ausbau vielmehr durch Dachanlagen in Kombination mit einem hohen Eigenstromverbrauch geprägt sein.

beeinflusst. Daher ist es im Zeitablauf noch stärker veränderlich als das technische, da sich der Vergleichsmaßstab der Wirtschaftlichkeit ebenfalls ändert (steigende Preise für fossile Energieträger erhöhen die Stromgestehungskosten von konventionellen Kraftwerken und verringern damit die Mehrkosten der davon weitgehend unabhängigen erneuerbaren Energien). Die Wirtschaftlichkeit einer Technologie kann aus betriebswirtschaftlicher Sicht z. B. eines Windenergieanlagenbetreibers (kostendeckender Betrieb bei Gewährung einer entsprechenden Vergütung für die erzeugte Elektrizität) oder aus volkswirtschaftlichen Sicht (Mehrkosten gegenüber alternativen Bereitstellungsoptionen) bestimmt werden. Das Ergebnis dieser Analysen kann durchaus unterschiedlich ausfallen. In dieser Arbeit ist das betriebswirtschaftliche Potenzial den Analysen zugrunde gelegt, welches gegenwärtig maßgeblich von den Fördersätzen im Erneuerbaren-Energien-Gesetz abhängt. Eine nicht absehbare Anpassung der Fördersätze kann daher die ermittelten wirtschaftlichen Potenziale stark ändern.

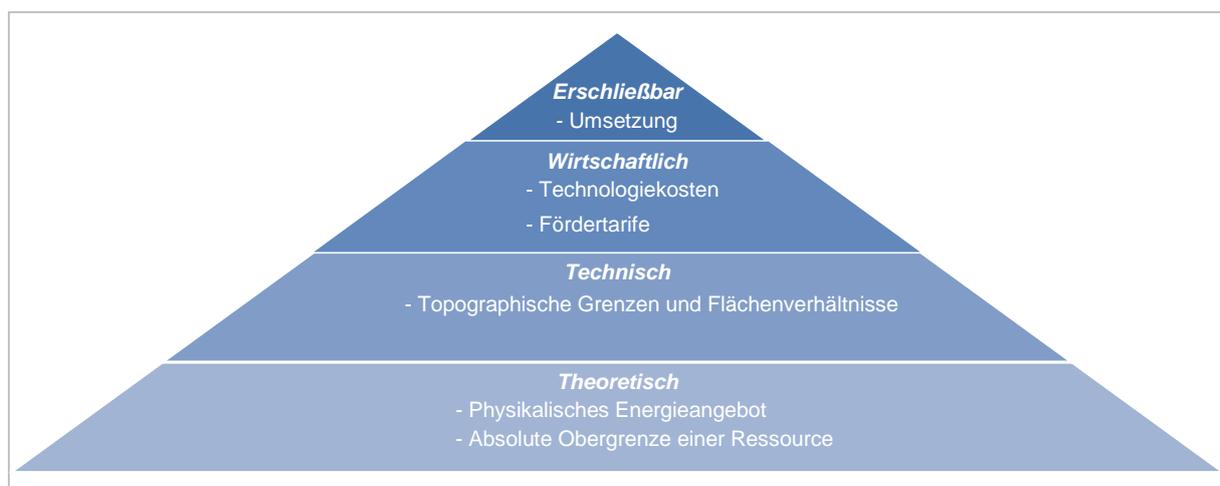


Abbildung 1.1: Abgrenzung des Potenzialbegriffes

Um die Unsicherheit bei Anpassungen von Fördersätzen zumindest teilweise zu erfassen, sind in der Arbeit nicht nur die absoluten wirtschaftlichen Potenziale ausgewiesen, sondern sogenannte Kostenpotenzialkurven. *Kostenpotenzialkurven* beschreiben die Stromgestehungskosten in Abhängigkeit des technischen Potenzials und geben daher einen guten Überblick, wie viel Potenzial zu welchen Stromgestehungskosten zur Verfügung steht. Daher kann beispielsweise die Auswirkung einer Änderung von Fördersätzen unmittelbar in den Kostenpotenzialdiagrammen abgelesen werden. Vom wirtschaftlichen Potenzial wird noch das *erschließbare Potenzial* abgegrenzt. In einem bestimmten Zeitraum kann nicht das gesamte wirtschaftliche Potenzial ausgeschöpft werden, da unter anderem dazu die entsprechenden technischen Anlagen gefertigt und errichtet werden müssen. Erschließbares bzw. ausschöpfbares Potenzial hängt u. a. von den Herstellerkapazitäten, verfügbarem Kapital (Fremdkapital von Banken bzw. Eigenkapital von Investoren), von administrativen und sozialen Gegebenheiten (z. B. Genehmigungsdauer, Widerstand von Anwohnern gegen neue Windenergieanlagen in der Umgebung), Aufnahmefähigkeit der Netze und Nutzungsalternativen (eine bestimmte Dachfläche kann z.B. mit einer Photovoltaik- oder einer Solarwärmanlage genutzt werden) ab. Das erschließbare Potenzial wird in dieser Arbeit explizit nicht behandelt, d.h. die hier genannten betriebswirtschaftlichen Potenziale stellen Obergrenzen für die unter heutiger Förderung maximal mögliche Nutzung von erneuerbarer Energien dar.

All diese Potenziale betrachten nur die Angebotsseite und vernachlässigen Restriktionen, die durch die Nachfrageseite bedingt sind. In anderen Worten: es wird nicht berücksichtigt, ob die Elektrizität auf Basis erneuerbarer Ressourcen zum Zeitpunkt der Verfügbarkeit auch tatsächlich vom Stromnetz aufgenommen und gebraucht wird. Aus diesem Grund stellen die Potenzialanalysen eine Grundlage für weitere Betrachtungen im Zusammenhang mit den Wechselwirkungen zwischen Angebot, Netz und Nachfrage dar. Die Potenzialdaten stehen daher auf Anfrage für weitere wissenschaftliche Arbeiten zur Verfügung.

2 Technische Potenziale und Ableitung Kostenpotenzialkurven

Für die Interpretation des technischen Potenzials erneuerbarer Energien ist eine wirtschaftliche Einordnung der Potenziale sinnvoll. Eine Möglichkeit der Bewertung stellen Kostenpotenzialkurven dar. Sie beschreiben welche Menge an elektrischer Energie des technischen Potenzials zu welchen Gesteungskosten zur Verfügung steht.

Im Folgenden werden Kostenpotenzialkurven des technischen Potenzials von Windenergie, Photovoltaik sowie das technische Potenzial an Biomasse im *Freistaat Sachsen* in hoher räumlicher Auflösung mithilfe geographischer Informationssysteme ermittelt. Abbildung 2.1 zeigt das grundsätzliche Vorgehen.

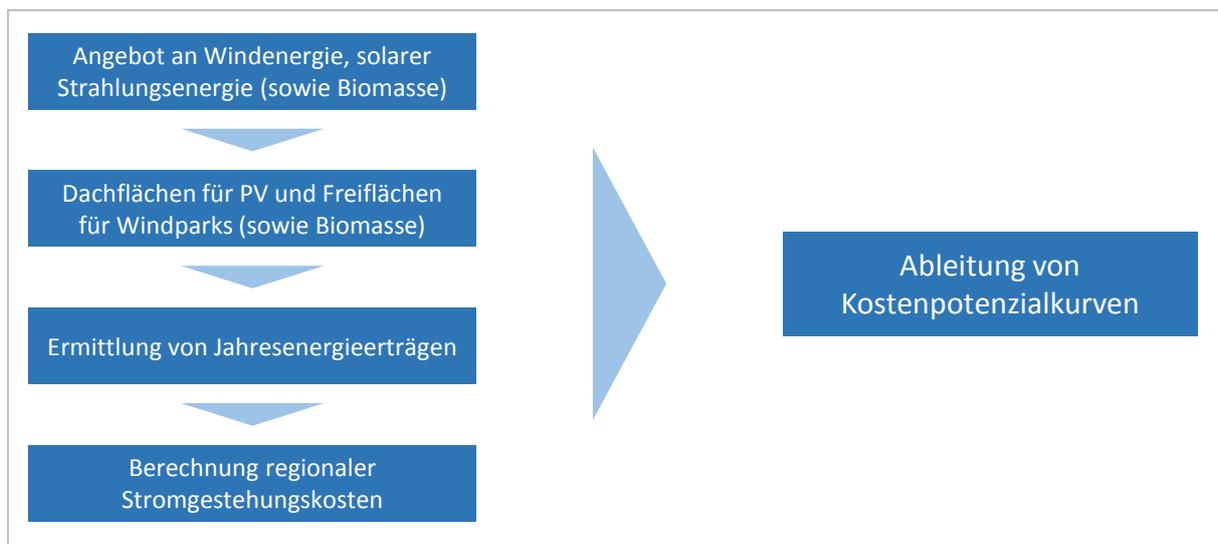


Abbildung 2.1: Ableitung von Kostenpotenzialkurven

Für den Energieträger Wind werden insgesamt vier Szenarien betrachtet. Es wird ein Szenario gebildet, in denen der Zubau von Windturbinen in Wäldern oder Gebieten mit waldähnlichem Bewuchs nicht gestattet ist (Basis-Szenario) sowie erlaubt ist (Szenario Wald). Darüber hinaus wird jeweils hinsichtlich eines Zubaus in Schutzgebieten in denen eine Einzelfallregelung der Genehmigung herrscht differenziert (Minimum- und Maximum-Szenario).

Die Stromgestehungskosten für Photovoltaik werden maßgeblich durch die Investitionen beeinflusst. Die Kosten für Photovoltaikmodule sind in den Jahren 2000 – 2012 durch den hohen Leistungszubau und den angestiegenen Produktionskapazitäten stark gefallen. Auch in den folgenden Jahren ist mit weiter fallenden Preisen für Photovoltaikmodulen zu rechnen. Daher werden für die Berechnung der Stromgestehungskosten für Photovoltaik Lernkurvenmodelle (in Anlehnung an Kost (2012)) genutzt und die Auswirkung unterschiedlicher Preisentwicklungen betrachtet. Die folgenden Tab. 2.1 und Tab 2.2 zeigen einen Überblick über die gebildeten Szenarien.

Tabelle 2.1: Szenarien Wind (Überblick)

<i>Basis-Szenario</i>	Basis min
	Basis max
<i>Szenario Wald</i>	Wald min
	Wald max

Tabelle 2.2: Szenarien PV (Überblick)

<i>Basis-Szenario</i>	Modulpreise 2013 Modulwirkungsgrad 2013
<i>Wenig PV Zubau</i>	Modulpreise 1200 EUR/kWp Modulwirkungsgrad 19%
<i>Viel PV Zubau</i>	Modulpreise 900 EUR/kWp Modulwirkungsgrad 21%

3 Berechnung von Stromgestehungskosten

Die Berechnung der Stromgestehungskosten

$$STGK = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+i)^t}} \quad 3.1$$

wird in Anlehnung an Konstantin (2009) auf Grundlage der Kapitalwertmethode durchgeführt. Bei diesem Berechnungsverfahren werden alle während der Laufzeit n auftretenden Zahlungsströme sowie die jährlichen Energieerträge E_t auf den gemeinsamen Bezugszeitpunkt t_0 abdiskontiert. Die Zahlungsmittelströme setzen sich aus der Anfangsinvestition I_0 sowie jährlich anfallenden Gesamtausgaben A_t zusammen. Zu den jährlichen Gesamtausgaben zählen neben fixen und variablen Betriebs- und Wartungsausgaben für die Anlagen auch Ausgaben für Reinvestitionen in Bauteile zur Ertüchtigung der Anlage. Der Diskontierungsfaktor $1 + i$ berücksichtigt die marktüblichen Kapitalkosten.

4 Windenergie

4.1 GIS-gestützte Ermittlung und Analyse von Freiflächen

Für die Bestimmung des technischen Potenzials von Windenergie in Sachsen ist die Ermittlung von Freiflächen zur Installation von Windturbinen A_{nutz} notwendig. Unterschieden werden muss dabei die Art der Landnutzung, die Auskunft über eine generelle Standorteignung gibt. Hierfür wird der Vektor-Datensatz Corine Landcover CLC 2006 der Federal Environment Agency (2009) herangezogen, der Auskunft über Art der Bodenbedeckung und Landnutzung in Europa gibt. Das Referenzjahr dieses Datensatzes ist 2006. Unterschieden werden insgesamt 44 Nutzungskategorien innerhalb von Deutschland bei einer minimalen Kartiereinheit von 25 m. Tabelle 4.1 stellt die in Sachsen vorherrschenden Kategorien der Landnutzung bzw. Bodenbedeckung dieses Datensatzes dar, die grundsätzlich für den Zubau von Windturbinen als geeignet erachtet werden.

Tabelle 4.1: Kategorien geeigneter Arten der Landnutzung für Windenergie sowie Rauigkeitslängen

<i>Landnutzung</i>	<i>Rauhigkeitslänge [m]</i>
Nicht bewässertes Ackerland	0,050
Obst- und Beerenobstbestände	0,100
Wiesen und Weiden	0,030
Landwirtschaft mit natürlicher Bodenbedeckung	0,300
Natürliches Grasland	0,030
Heiden und Moorheiden	0,030
Flächen mit spärlicher Vegetation	0,005
Laubwald	0,750
Nadelwald	0,750
Mischwald	0,750
Wald-Strauch-Übergangsstadien	0,600

Eine besondere Rolle spielen Flächen mit Wäldern bzw. waldähnlichem Bewuchs. Ein großer Teil der Waldflächen des Freistaates Sachsen befindet sich im Erzgebirge. Aufgrund der größeren Höhe korrelieren sie stark mit hohen Windgeschwindigkeiten und verfügen über ein großes technisches Potenzial. Allerdings werden Waldflächen häufig von der Nutzung für Windenergie ausgeschlossen (Bofinger et al. 2011). Daher werden diese Waldflächen durch Bildung eines Szenarios, in dem auch in Wäldern Windturbinen zugebaut werden, berücksichtigt.

Bei der Errichtung von Windturbinen müssen in der Regel Mindestabstände zu Siedlungsflächen eingehalten werden. Die Bund-Länder-Initiative Windenergie (2012) weist für Siedlungsflächen in Sachsen einen Mindestabstand von 750-1000 m aus, bei Einzelwohngebäuden und Splittersiedlungen werden 300-500 m eingehalten. Der Datensatz Corine Landcover CLC 2006 weist die Siedlungsflächen Sachsens überwiegend als Flächen nicht-durchgängig städtischer Prägung aus. Eine scharfe Trennung zwischen Siedlungsflächen und Einzelwohngebäuden sowie Splittersiedlungen ist demnach nicht möglich. Aus diesem Grund werden die Flächen prinzipieller Eignung für Windenergie um Abstandsflächen um Siedlungsgebiete mit einem Abstand von 500 m vermindert.

Zudem werden Flächen prinzipieller Eignung um Schutzgebiete reduziert, die durch den Datensatz World Database on Protected Areas (WDPA) der International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN) sowie dem United Nations Environment Programme (UNEP) (2013) klassifiziert nach dem System der IUCN beschrieben werden. Differenziert werden Schutzgebiete der IUCN-Klasse *II Nationalpark* sowie Klasse *IV Biotop/Artenschutzgebiet* von Gebieten der Klasse *V Geschützte Landschaft*. Die Genehmigung von Windturbinen ist in Sachsen gemäß dem Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft des Freistaates Sachsen in den Gebieten der Klasse II sowie Klasse IV unzulässig bzw. regelmäßig unzulässig (SMUL 2001). Dagegen besteht in Gebieten der Klasse V eine Einzelfallregelung. Aus diesem Grund wird ferner ein Szenario gebildet, in dem der Zubau in Gebieten der Klasse V (Einzelfallregelung) zugelassen wird. Beide Szenarien berücksichtigen Abstandsflächen mit einem Abstand von 500 m um Schutzgebiete (SMUL 2001).

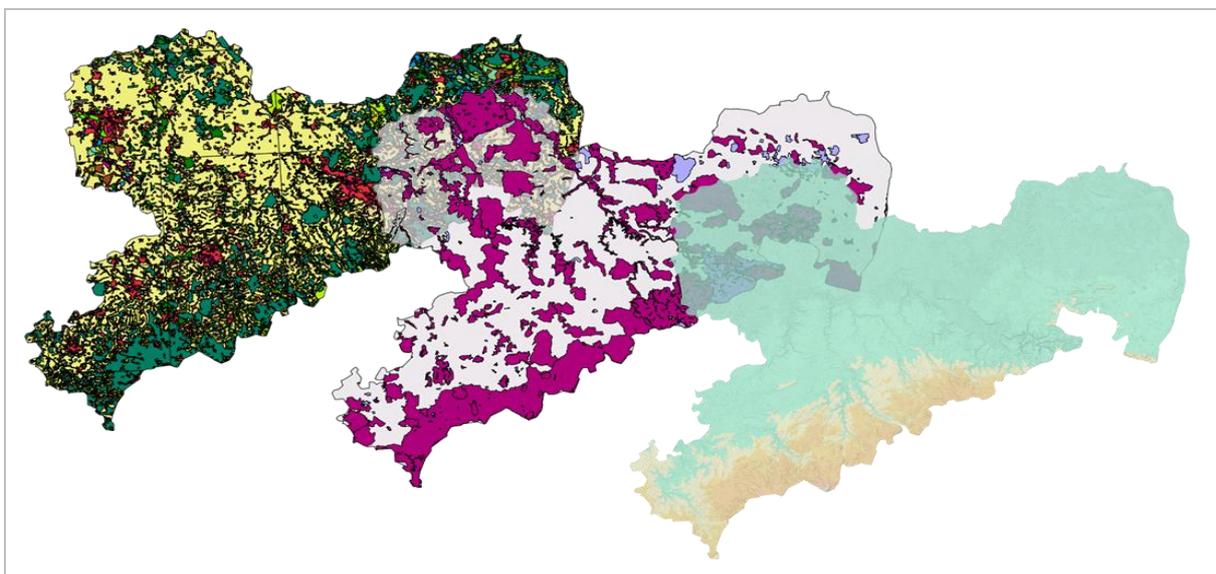


Abbildung 4.1: Verschneidung von Landnutzung, Schutzgebieten und extremen Hanglagen

Weiterhin werden Freiflächen um extreme Hanglagen mit einer Steigung größer als 20° mithilfe des digitalen Höhenmodells ASTER GDEM Version 2 von METI und dem NASA Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) (2013) vermindert. Einzelne, nicht plausible Rasterwerte werden zuvor eliminiert. Dieses Höhenmodell ist rasterbasiert und bildet Flächen zwischen 83° nördlicher Breite und 83° südlicher Breite in einer Auflösung von 30 m mit einer hohen Datenkonsistenz ab. Einen Auszug aus den mithilfe von GIS verarbeiteten Daten ist in Abb. 4.1 dargestellt.

4.2 Energiewandlung

4.2.1 Zusammenhang von elektrischer Leistung und Windgeschwindigkeit

Die in bewegten Luftmassen enthaltene Leistung

$$P_{kin} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot c^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c^3 \quad 4.1$$

kann über den Massendurchsatz durch eine Bilanzfläche A berechnet werden. Dabei beschreibt ρ die Dichte der Luftmasse und c die Geschwindigkeit mit der sich die Masse m bewegt. Über Leistungskennlinien wird direkt ein Zusammenhang aus der elektrischen Leistung $P(c)$ einer Windturbine und der Windgeschwindigkeit hergestellt. Bei bekannter Windgeschwindigkeit bzw. Verteilung der Windgeschwindigkeiten kann unter Verwendung der Leistungskennlinien die generierte elektrische Leistung ermittelt werden.

4.2.2 Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe

Die Geschwindigkeit ungestörter Strömung in großer Höhe wird aufgrund von Reibung in Bodennähe auf Null abgebremst. Das Verhältnis aus der Windgeschwindigkeit einer definierten Höhe h zur Geschwindigkeit des Windes in einer Referenzhöhe h_{ref} kann durch die logarithmische Höhenformel

$$\frac{c_h}{c_{ref}} = \frac{\ln(h/z_0)}{\ln(h_{ref}/z_0)} \quad 4.2$$

näherungsweise abgebildet werden. Dabei beschreibt z_0 die Rauigkeits-Länge des Untergrundes. Troen und Petersen (1990) beschreiben Rauigkeits-Längen in der Einheit Meter zwischen 10^{-4} und 1 für unterschiedliche Oberflächen des Untergrundes. Auf Grundlage von Troen und Petersen (1990) und in Anlehnung an Sliz-Szkliniarz und Vogt (2011) werden die in Tab. 4.1 genannten Rauigkeits-Längen für Nutzflächen für Windenergie herangezogen.

Anzumerken ist, dass durch Anwendung der logarithmischen Höhenformel Windgeschwindigkeiten in Höhen über 60 Meter tendenziell unterschätzt werden (Hau 2003). Für die weiteren Berechnungen werden Windgeschwindigkeiten in der Höhe 80 m über Grund mithilfe dieser Höhenformel auf die Nabenhöhe 100 Meter extrapoliert. Aufgrund der nur geringen Anpassung von 20 Metern wird dieser Fehler vernachlässigt.

4.2.3 Berechnung der Jahresenergieerträge

Die Berechnung der Jahresenergieerträge stützt sich auf einen Datensatz über die Form- und Skalierungsfaktoren der Weibull-Verteilungen für Sachsen in der Höhe 80 m über Grund rasterfeldscharf (200 m x 200 m) des Deutschen Wetterdienstes. Mithilfe dieser Faktoren kann die Dichtefunktion der Weibull-Verteilung über die Windgeschwindigkeiten c je Rasterfeld i

$$f_i(c) = \frac{k}{A} \cdot \left(\frac{c}{A}\right)^{k-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{c}{A}\right)^k\right) \quad 4.3$$

aufgestellt werden. Dabei beschreibt k den Formparameter der Verteilung und A den Skalenparameter. Durch Integration von Dichtefunktion der Weibull-Verteilung, Leistungsfunktion einer Turbine $P(c)$ und einem geschwindigkeitsabhängigen Faktor $f_{z_0}(c)$, multipliziert mit den Faktoren f_a und f_l sowie t berechnet sich der Jahresenergieertrag einer einzelnen Turbine je Rasterfeld i

$$E_{a,i}^{Turb} = t \cdot f_a \cdot f_l \int_{c_e}^{c_a} f_i(c) \cdot P(c) \cdot f_{z_0}(c) \quad 4.4$$

im Windpark. Dabei beschreibt f_a die technische Verfügbarkeit der Turbine und f_l Verluste aufgrund von Abschattungen und Netzanschluss. Der geschwindigkeitsabhängige Faktor $f_{z_0}(c)$ berücksichtigt indirekt die kubische Leistungszunahme bei von 80 m über Grund abweichenden Nabenhöhen unter Berücksichtigung der entsprechenden Rauigkeits-Länge des Untergrundes durch Anwendung der logarithmischen Höhenformel aus Gl. 4.2. Durch Multiplikation mit dem Faktor t , in diesem Fall $t = 8760 h$, wird die Einheit der zeitlichen Dimension bestimmt. Gemäß Gl. 3.1 werden mithilfe dieses Ertrages die Gestehungskosten von Windstrom je Rasterfeld i berechnet.

In der Praxis wird beim Design von Windparks versucht, eine möglichst ungestörte Anströmung der einzelnen Windturbinen zu gewährleisten. Dafür werden Mindestabstände zwischen den Turbinen eingehalten. Aus diesem Grund werden die Windturbinen zur Bestimmung des technischen Potenzials über eine angenommene flächenbezogene Leistungsdichte platziert. Hierfür wird zunächst der normierte Jahresenergieertrag einer einzelnen Windturbine je Rasterfeld

$$E_{a,i}^{norm} = \frac{E_{a,i}^{Turb}}{P_{inst}} \quad 4.5$$

herangezogen, der sich durch Division des Jahresenergieertrages einer Turbine $E_{a,i}^{Turb}$ mit der installierten Leistung P_{inst} berechnet.

Die um eine Turbine mindestens freizuhalten Fläche berechnet sich bei wechselnden Windrichtungen nach Kaltschmitt et al. (2003) wie folgt:

$$A_{Turb} = \sqrt{\frac{3}{4}} (k_A \cdot d_{Rot})^2 \quad 4.6$$

Dabei entspricht k_A einem Abstandsfaktor (in der Regel zwischen 6 und 15) und d_{Rot} dem Durchmesser des Rotors der Turbine.

Die auf die Fläche bezogene Leistungsdichte

$$P_{dens} = \frac{P_{inst}}{A_{Turb}} \quad 4.7$$

entspricht dem Quotienten aus der installierten Leistung einer Turbine und der mindestens frei zu haltenden Fläche. Der Jahresenergieertrag je Rasterfeld und in Abhängigkeit der Nutzfläche A_{nutz}

$$E_{a,i}^{tech} = E_{a,i}^{norm} \cdot P_{dens} \cdot A_{nutz} \quad 4.8$$

wird durch Multiplikation des normierten Jahresenergieertrages, der flächenbezogenen Leistungsdichte sowie der für die Errichtung von Windturbinen zur Verfügung stehenden Fläche ermittelt. Dieser Energieertrag entspricht dem technischen Potenzial je Rasterfeld. Durch Summation der Erträge aller Rasterfelder wird das gesamte technische Potenzial Sachsens

$$E_a^{tech} = \sum_{i=1}^n E_{a,i}^{tech} \quad 4.9$$

berechnet. Zur Bestimmung der Kostenpotenzialkurven werden jedem Rasterfeld in Abhängigkeit der Windverhältnisse entsprechende Gestehungskosten zugewiesen.

4.3 Technische und wirtschaftliche Parameter

Die folgende Tab. 4.2 stellt zusammenfassend die Annahmen bezüglich der technischen und wirtschaftlichen Parameter dar, die den Berechnungen zu Grunde liegen. Die Anlagencharakteristika beziehen sich auf die Turbine E-82 mit einer Nennleistung von 2,3 MW des Herstellers Enercon. Der Hersteller Enercon weist den größten Marktanteil in Deutschland auf (statista 2013). Zudem dominieren derzeit in Sachsen Neuanlagen dieser Leistungsklasse (50 Hertz 2013a), so dass die Verwendung einer Anlage dieser Leistungsklasse für die Potenzialermittlung plausibel scheint. Zudem werden die Ergebnisse mit einer Änderung der Leistungsklasse auf eine 3 MW Anlage (Vestas V112) sensitiviert.

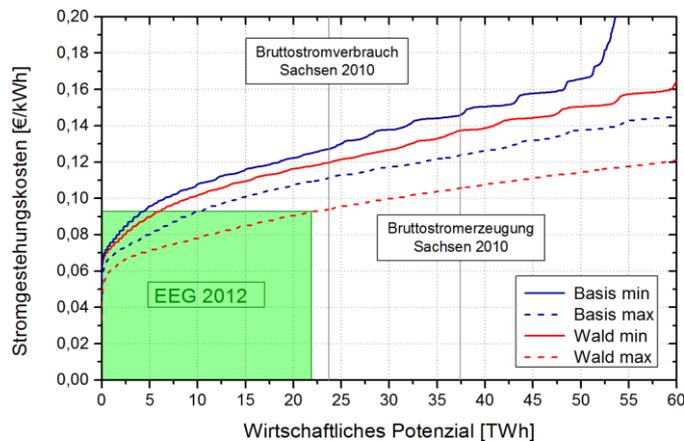
Tabelle 4.2: Technische und wirtschaftliche Parameter Windenergie

<i>Technische Verfügbarkeit</i>	f_a	0,98	Hau 2003, Kaltschmitt et al. 2003, Schmid und Klein 1991
<i>Wirkungsgrad Windpark</i>	f_l	0,9	Hau 2003, Kaltschmitt et al. 2003, Schmid und Klein 1991
<i>Installierte Leistung</i>	$P_{inst} [MW]$	2,3 / 3,0	Enercon 2013 / Vestas
<i>Nabenhöhe</i>	$h [m]$	100 / 120	Enercon 2013 / Vestas
<i>Rotordurchmesser</i>	$d_{Rot} [m]$	82 / 112	Enercon 2013 / Vestas
<i>Abstandsfaktor</i>	k_a	6	Hau 2003
<i>Spezifische Investitionen</i>	$I_0 [EUR/kW]$	1400	Wallasch et al. 2011
<i>Fixe spezifische Betriebskosten</i>	$A_t [EUR/(kW \cdot a)]$	35	Hau 2003, Kaltschmitt et al. 2003, Wallasch et al. 2011
<i>Laufzeit</i>	$n [a]$	20	Kost et al. 2012
<i>WACC</i>	i	0,059	Kost et al. 2012
<i>Steigerung der Betriebskosten</i>	[%]	2	Kost et al. 2012

4.4 Ergebnisse

4.4.1 Kostenpotenzialkurven Sachsen

Die folgende Abb. 4.2 stellt die berechneten Kostenpotenzialkurven für Windenergie im Freistaat Sachsen für die gebildeten Szenarien dar.



<i>Szenario</i>	<i>Wirtschaftliches Potenzial [TWh]</i>
Basis min	4,27
Basis max	9,94
Wald min	5,92
Wald max	21,93

Abbildung 4.2: Kostenpotenzialkurven Windenergie

Zudem sind der Bruttostromverbrauch (23,697 TWh) sowie die Bruttostromerzeugung (37,431 TWh) Sachsens aus dem Jahre 2010 nach SMWA (2012) sowie die EEG-Vergütung für Strom aus Windenergie nach dem EEG 2012 in Höhe von 9,27 ct/kWh für Anlagen mit einer Inbetriebnahme im Jahr 2013 abgetragen. Berücksichtigt werden dabei die Anfangsvergütung sowie der Systemdienstleistungsbonus (siehe Exkurs). Das Potenzial zu maximalen Gestehungskosten der EEG-Vergütung (wirtschaftliches Potenzial) variiert zwischen 4,27 TWh und 21,93 TWh und liegt somit unter dem Bruttostromverbrauch. Dieser kann in der Jahressumme abhängig vom Szenario nur mit maximalen Gestehungskosten durch Nutzung von Anlagen, die mit der EEG-Vergütung nicht wirtschaftlich betrieben werden können (und damit zu Teilen über das wirtschaftliche Potenzial hinaus), zwischen 9,40 ct/kWh und 12,71 ct/kWh gedeckt werden.

Exkurs: Vergütungen für Strom aus Windenergie (§§ 29 – 31 EEG 2012):

- ⇒ Vergütungszeitraum: **20 Jahre**
Degression: **1,5%** bezogen auf das Jahre der Inbetriebnahme
- ⇒ **Anfangsvergütung** (mind. 5 Jahre) und daran anschließende **Grundvergütung**. Die Anfangsvergütung verlängert sich um 2 Monate je 0,75% des Ertrages, den die Anlage den Referenzertrag von 150% unterschreitet.
- ⇒ Die Erfüllung der Anforderungen für Systemdienstleistungen (SDL) ist bei einem Anschluss ab dem 01.04.2011 verpflichtend. Es wird ein **SDL-Bonus** für den Zeitraum der Anfangsvergütung bei einem Anschluss bis zum 31.12.2014 gewährt.

Inbetriebnahme	Grundvergütung [ct/kWh]	Anfangsvergütung [ct/kWh]	SDL-Bonus [ct/kWh]
2012	4,87	8,93	0,48
2013	4,80	8,80	0,47
2014	4,72	8,66	0,47
2015	4,65	8,53	0,46
2016	4,58	8,41	-
...

Einen erheblichen Einfluss hat die Berücksichtigung von Waldflächen auf den Jahresenergieertrag. Wird ein Zubau von Windturbinen in Wäldern bzw. Gebieten mit waldähnlichem Bewuchs zugelassen, so erhöht sich der Jahresenergieertrag deutlich. Noch größer ist die Zunahme des Ertrages bei Berücksichtigung von Schutzgebieten der Klasse *V Geschützte Landschaft*, in der eine Einzelfallregelung der Genehmigung von Windturbinen besteht.

4.4.2 Wirtschaftliches Potenzial auf Stadt- und Landkreis-Ebene

Das wirtschaftliche Potenzial variiert zwischen den Szenarien je nach Anteil von Waldflächen sowie Schutzgebieten der Klasse *V Geschützte Landschaft* und in Abhängigkeit der Windverhältnisse von Landkreis zu Landkreis sehr. Abbildung 4.3 stellt das wirtschaftliche Potenzial bezogen auf eine EEG-Vergütung von 9,27 ct/kWh auf Stadt- und Landkreis-Ebene als Säulendiagramm dar.

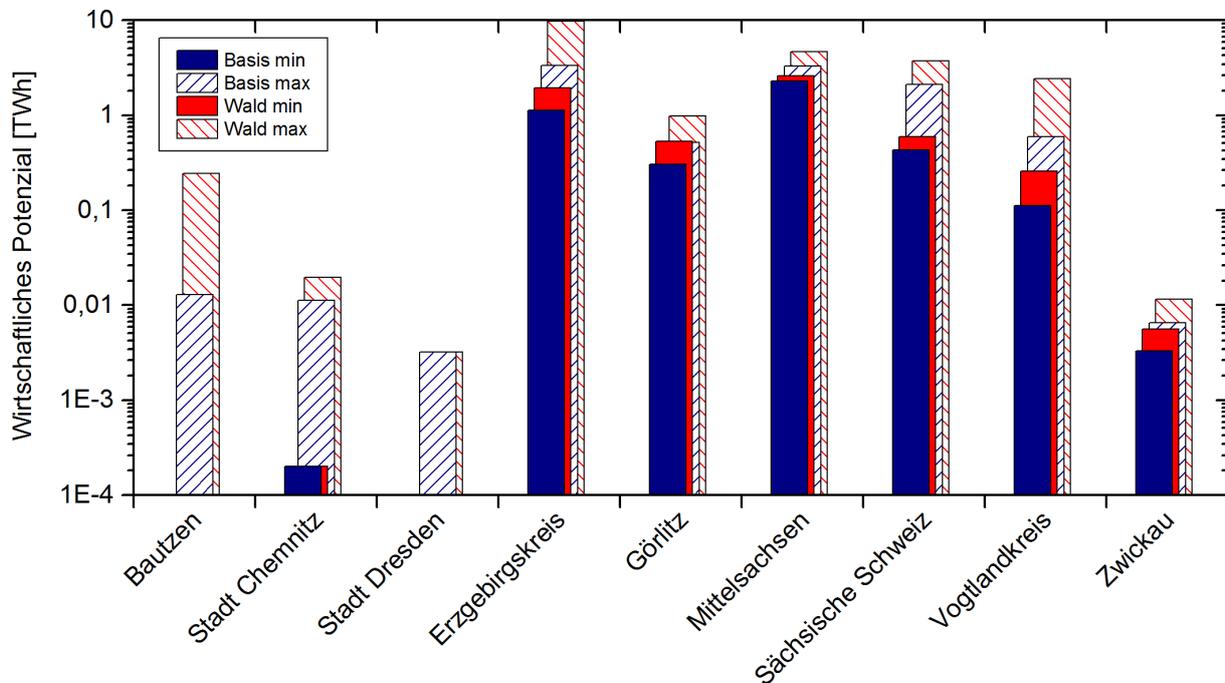


Abbildung 4.3: Wirtschaftliches Potenzial auf Landkreis- und Stadt-Ebene

Ein Großteil des wirtschaftlichen Potenzials kann den Landkreisen Görlitz, Mittelsachsen, Sächsische Schweiz/Osterzgebirge, Vogtlandkreis sowie Erzgebirgskreis zugeordnet werden. Im Szenario Basis Minimum variiert das Potenzial dieser Landkreise zwischen 0,11 TWh und 2,29 TWh und entspricht in Summe einem Anteil von 99,91% des gesamten wirtschaftlichen Potenzials dieses Szenarios. Ein deutlicher Anstieg des wirtschaftlichen Potenzials ist insbesondere in letzteren drei Landkreisen zu verzeichnen, wenn ein Zubau von Windenergieanlagen in Schutzgebieten der Klasse *V Geschützte Landschaft* sowie in Flächen in Wäldern oder mit waldähnlichem Bewuchs zugelassen wird. Die Landkreise bzw. Städte Bautzen, Chemnitz, Dresden, Leipzig, Leipzig (Stadt), Meißen und Nordsachsen verfügen dagegen über nur geringe wirtschaftliche Potenziale, welche in der in Abb. 4.4 gewählten Skalierung nur bedingt bzw. nicht darstellbar sind.

4.4.3 Wirtschaftliches Potenzial auf Gemeinde-Ebene

Eine genauere Aussage über das wirtschaftliche Potenzial kann getroffen werden, wenn die Gemeinden des Freistaates Sachsens im Einzelnen betrachtet werden. Hier sollten Energieerträge und Gestehungskosten in Abhängigkeit voneinander analysiert werden, da einzelne Gemeinden zwar über geringe ertragsgewichtete mittlere Stromgestehungskosten verfügen können, jedoch aufgrund eines nur kleinen Flächenpotenzials geringe technische Potenziale aufweisen. Herangezogen werden die ertragsgewichteten mittleren Stromgestehungskosten je Gemeinde. Abbildung 4.4 stellt das

wirtschaftliche Potenzial über den Stromgestehungskosten für das Szenario Basis min dar. Für die weiteren Szenarien wird analog vorgegangen.

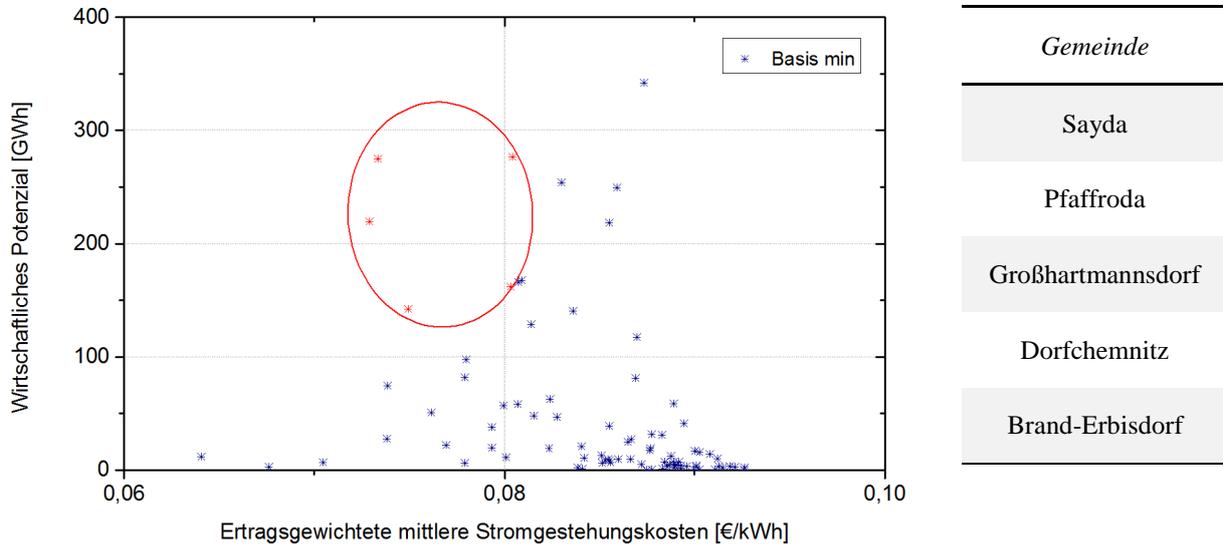


Abbildung 4.4: Wirtschaftliches Potenzial und Gestehungskosten auf Gemeinde-Ebene

Rot dargestellt und umkreist sind die fünf Gemeinden G_j , die über ein großes wirtschaftliches Potenzial in Kombination mit geringen ertragsgewichteten mittleren Gestehungskosten verfügen. Sie weisen das größte Produkt aus der absoluten positiven Abweichung des Ertrages und der Gestehungskosten zum jeweiligen Mittelwert auf:

$$G_j = \left(E_{a,j}^{wirtsch} - \overline{E_{a,j}^{wirtsch}} \right) \times \left(\overline{LCOE_j} - LCOE_j \right), \quad \forall \begin{cases} E_{a,j}^{wirtsch} > \overline{E_{a,j}^{wirtsch}} \\ LCOE_j < \overline{LCOE_j} \end{cases} \quad 4.10$$

Die folgende Tab. 4.3 fasst alle fünf Gemeinden mit dem größten Potenzial nach Gl. 4.10 der einzelnen Szenarien zusammen. Zudem werden das entsprechende wirtschaftliche Potenzial und die ertragsgewichteten mittleren Gestehungskosten ausgewiesen. Sie sind in der sich aus der Bildung des Produktes ergebenden Rangfolge aufgeführt.

Tabelle 4.3: Großes wirtschaftliches Potenzial in Kombination mit geringen Gestehungskosten auf Gemeinde-Ebene

	<i>Gemeinde</i>	<i>Landkreis</i>	<i>Wirtschaftliches Potenzial [GWh]</i>	<i>STGK, gewichtet [ct/kWh]</i>
<i>Basis min</i>	Sayda	Mittelsachsen	274,86	7,33
	Pfaffroda	Erzgebirgskreis	219,32	7,29
	Großhartmannsdorf	Mittelsachsen	276,73	8,04
	Dorfchemnitz	Mittelsachsen	142,28	7,49
	Brand-Erbisdorf	Mittelsachsen	162,04	8,03
<i>Basis max</i>	Altenberg	Sächsische Schweiz - Osterzgebirge	479,28	7,24
	Sayda	Mittelsachsen	366,21	7,35
	Pfaffroda	Erzgebirgskreis	395,73	7,50
	Marienberg	Erzgebirgskreis	365,04	7,47
	Frauenstein	Mittelsachsen	503,84	7,77
<i>Wald min</i>	Sayda	Mittelsachsen	388,48	7,22
	Pfaffroda	Erzgebirgskreis	284,70	7,41
	Marienberg	Erzgebirgskreis	194,83	7,41
	Großhartmannsdorf	Mittelsachsen	310,42	8,01
	Elterlein	Erzgebirgskreis	215,92	7,71
<i>Wald max</i>	Altenberg	Sächsische Schweiz – Osterzgebirge	1283,35	7,30
	Oberwiesenthal	Erzgebirgskreis	751,38	6,47
	Eibenstock	Erzgebirgskreis	912,52	7,40
	Marienberg	Erzgebirgskreis	1051,19	7,60
	Sayda	Mittelsachsen	549,41	7,35

In den Basis-Szenarien dominieren Gemeinden des Landkreises Mittelsachsen. So weist dieser Landkreis insgesamt sechs von zehn Gemeinden auf, die über ein großes wirtschaftliches Potenzial bei geringen Gestehungskosten verfügen. Wird der Zubau von Windturbinen in Wäldern sowie Schutzgebieten in denen eine Einzelfallregelung der Genehmigung herrscht zugelassen (Szenario Wald und Szenario Wald max), überwiegen die größten Potenziale in Gemeinden des Landkreises Erzgebirgskreis. Zudem ist aus Tab. 4.3 das insgesamt deutlich größere wirtschaftliche Potenzial bei geringeren Gestehungskosten des Szenario Wald max im Vergleich zu den weiteren Szenarien ersichtlich.

4.5 Sensitivierung der Ergebnisse

4.5.1 Erweiterung der Mindestabstände zur Wohnbebauung

Der Freistaat Bayern hat zusammen mit dem Freistaat Sachsen eine Bundesratsinitiative mit dem Ziel strengerer Bauvorschriften für die Errichtung von Windenergieanlagen gegründet. Der gemeinsame Entwurf eines Gesetzes zur Ergänzung des Baugesetzbuches (BauGB) vom 2. Juli 2013 räumt den

Bundesländern Befugnisse ein, die Privilegierung von Windenergie im Außenbereich von der Einhaltung höhenbezogener Abstandsregelungen abhängig zu machen:

„(8) Die Länder können bestimmen, dass § 35 Abs. 1 Nr. 5 auf Vorhaben, die der Erforschung, Entwicklung oder Nutzung der Windenergie dienen, nur Anwendung findet, wenn diese Vorhaben einen angemessenen höhenbezogenen Mindestabstand zur Wohnbebauung einhalten“ (Freistaat Bayern 2013).

Ferner können die Länder gemäß diesem Gesetzentwurf bei der Ausweisung von Vorranggebieten darüber bestimmen, dass angemessene höhenbezogene Mindestabstände einzuhalten sind. Dem Grundsatz der Verhältnismäßigkeit entsprechend wird dabei in Anbetracht unterschiedlicher regionaler Gegebenheiten ein Mindestabstand, der mit dem Faktor zehn der Gesamthöhe der Windenergieanlage einhergeht, als Obergrenze der Angemessenheit gesehen.

Zwar wurde in der vorliegenden Analyse eine Turbine mit einer Gesamthöhe von 141 Metern gewählt, gegenwärtig können Anlagen höherer Leistungsklassen jedoch durchaus eine Gesamthöhe von 200 Metern erreichen. Demzufolge ergibt sich bei Anwendung dieser Obergrenze ein Mindestabstand zu bewohnten Siedlungen von 2000 Metern.

Im Folgenden werden das technische und wirtschaftliche Potenzial der Windenergie im Freistaat Sachsen unter Berücksichtigung von Mindestabständen zur Wohnbebauung von 1000 sowie 2000 Metern berechnet und Kostenpotenziale abgeleitet. Abbildung 4.5 zeigt die Ergebnisse.

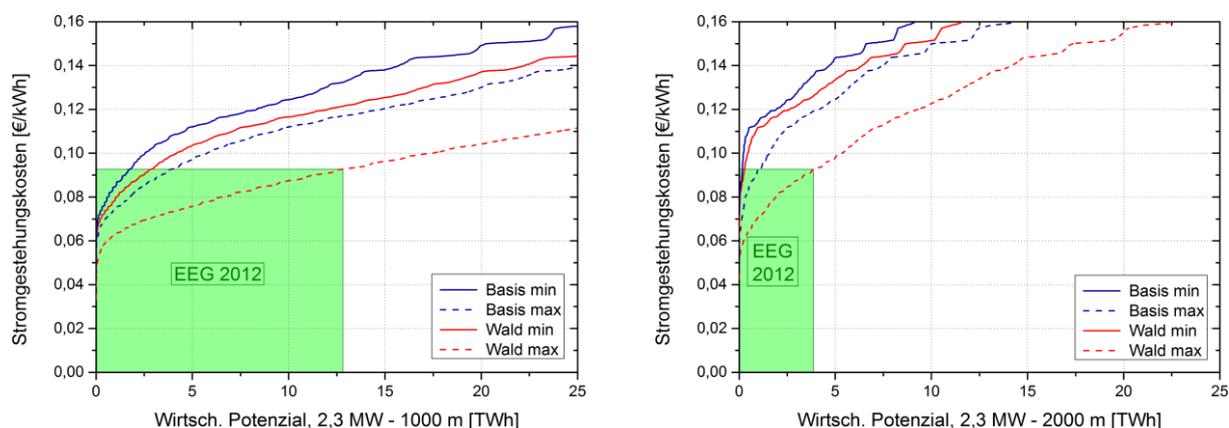


Abbildung 4.5: Kostenpotenzialkurven Windenergie (Mindestabstand 1000 sowie 2000 Meter)

Die Vergrößerung des Mindestabstandes zur Wohnbebauung wirkt sich erheblich auf das wirtschaftliche Potenzial aus. Die folgende Tab. 4.4 stellt das wirtschaftliche Potenzial bei einem Mindestabstand von 500 m, 1000 m sowie 2000 m für das Basis-Szenario vergleichend gegenüber.

Tabelle 4.4: Wirtschaftliches Potenzial bei Mindestabstand von 2000 m und 500 m

<i>Szenario</i>	<i>Wirtschaftliches Potenzial [TWh]</i>		
	<i>500 m</i>	<i>1000 m</i>	<i>2000 m</i>
Basis min	4,27	1,76	0,16
Basis max	9,94	3,92	1,01

Die Erhöhung von Mindestabständen hat signifikante Auswirkungen auf die weiteren Ausbaumöglichkeiten von Windenergieanlagen in Sachsen. Im Jahre 2012 betrug die elektrische Einspeisung an Windenergie aus EEG geförderten Windenergieanlagen im Freistaat Sachsen 0,70 TWh (50 Hertz 2013b). Wird kein Zubau in Schutzgebieten der Klasse *V Geschützte Landschaft* zugelassen, ist ein weiterer wirtschaftlicher Ausbau gemessen an der EEG-Vergütung bei Inbetriebnahme in 2013 bei Berücksichtigung von Mindestabständen in Höhe von 2000 m nicht möglich. Die Einführung von Mindestabständen von 2000 Metern würde somit den weiteren Ausbau an Windenergieanlagen nahezu vollständig zum Erliegen bringen.

4.5.2 Wirtschaftliches Potenzial bei einer installierten Leistung von 3 MW je Turbine

Der Anlagenbestand in Sachsen ist historisch gewachsen und weist eine Vielzahl unterschiedlicher Leistungsklassen auf. Bei den Neuanschlüssen in den letzten Jahren überwiegen Turbinen mit einer installierten Leistung von etwa 2 MW. Vereinzelt wurden jedoch auch Turbinen mit einer elektrischen Leistung von ca. 3 MW installiert (50 Hertz 2014a).

Grundsätzlich werden leistungsstärkere Turbinen bedingt durch eine größere Rotorflächen mit einer höheren Nabe verbaut. Hieraus resultieren höhere Belastungen durch Immissionen, so dass tendenziell ein größerer Mindestabstand zur Wohnbebauung eingehalten wird. Aus diesen Gründen wird für die weitere Sensitivierung hinsichtlich der Anlagenleistung je Turbine ein Mindestabstand von 1000 m zu Siedlungsflächen gewählt.

Die folgende Tab. 4.5 zeigt das wirtschaftliche sowie technische Potenzial an Windenergie im Freistaat Sachsen bei Mindestabständen von 1000 Metern und einer Anlagenleistung von 3 MW. Zum besseren Vergleich wird diesen Ergebnissen das entsprechende Potenzial bei einer installierten Leistung von 2,3 MW gegenübergestellt. Betrachtet wird das Basis-Szenario.

Tabelle 4.5: Wirtschaftl. und techn. Potenzial bei 1000 m Mindestabstand sowie 2,3 MW und 3 MW installierter Leistung

<i>Szenario (3 MW)</i>	<i>Wirtsch. Potenzial [TWh]</i>	<i>Techn. Potenzial [TWh]</i>
Basis min	22,67	34,69
Basis max	35,51	57,63

<i>Szenario (2,3 MW)</i>	<i>Wirtsch. Potenzial [TWh]</i>	<i>Techn. Potenzial [TWh]</i>
Basis min	1,76	30,49
Basis max	3,92	50,69

Aus den Ergebnissen in Tab. 4.5 sind zwei gegenläufige Effekte ersichtlich. Zwar erhöht sich das technische Potenzial bei größerer installierter Leistung je Turbine nur geringfügig, die Erhöhung der Anlagenleistung bewirkt jedoch einen erheblichen Anstieg des wirtschaftlichen Potenzials.

Den Berechnungen liegt eine flächenbezogene Leistungsdichte zu Grunde, die wiederum den Rotordurchmesser je Turbine berücksichtigt, um Abschattungsverluste abhängig vom verwendeten Turbinentyp abzubilden. Aufgrund größerer Abstände zwischen den einzelnen Turbinen ist die kumulierte installierte Leistung bei Verwendung einer 3 MW Turbine (bei konstanter Nutzungsfläche) geringer. Hieraus resultiert ein nur geringfügiger Anstieg des technischen Potenzials.

Der starke Anstieg des wirtschaftlichen Potenzials ist mit einer größeren Nabhöhe sowie einer stärkeren Auslastung der 3 MW Turbine begründet, wie in der folgenden Abb. 4.6 skizziert.³

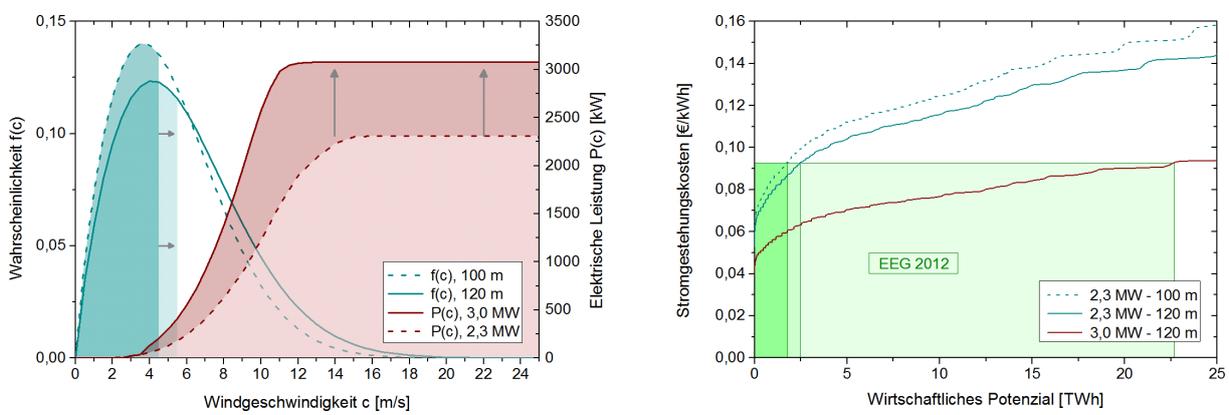


Abbildung 4.6: Ertragszunahme bei Erhöhung der Anlagenleistung auf 3 MW (Szenario Basis min)

Aufgrund der um 20 m erhöhten Nabe der 3 MW Turbine findet ein Leistungsumsatz bei größeren Windgeschwindigkeiten statt. Dargestellt ist dieser Effekt in einer Rechtsverschiebung des Medians der Weibull-Verteilung (Abb. 4.6 (linke Seite)). Hieraus resultiert ein Zuwachs des wirtschaftlichen Potenzials. Um diesen Anstieg zu quantifizieren, wird zunächst das wirtschaftliche Potenzial bei Verwendung der 2,3 MW Turbine und einem Anstieg der Nabhöhe auf 120 m berechnet. Dieses erhöht sich von 1,76 TWh auf 2,47 TWh (40,4% Zuwachs). Ein Vergleich des technischen Potenzials ergibt eine Erhöhung des Ertrages von 0,31% pro Meter im Intervall von 100 m bis 120 m. Maßgeblich fließen in dieses Ergebnis die in Tab. 4.1 genannten Rauigkeitslängen ein. Die den Ertragszuwachs deutlich übersteigende Zunahme des wirtschaftlichen Potenzials lässt darauf schließen, dass sich bei der 2,3 MW Turbine die mittlere Geschwindigkeit, die den Übergang zwischen wirtschaftlichem und unwirtschaftlichem Betrieb beschreibt, im Grenzbereich der Verteilung der mittleren Windgeschwindigkeiten aller Nutzungsflächen liegt.

Anzumerken ist, dass bei den hier vorliegenden Berechnungen ein logarithmisches Geschwindigkeitsprofil gewählt wurde. In dem hier vorliegenden Grenzbereich von 80-120 m kann die Strömung, je nach Witterungsbedingungen, sich bereits in der Ekman-Schicht befinden, sodass mit der

³ Zur besseren Darstellung wurde die Dichtefunktion der Weibull-Verteilung in Abb. 4.6 um mehr als 20 m Höhenzunahme extrapoliert. Es wurde für diese Darstellung ferner ein konstanter Formparameter gewählt.

Anwendung der logarithmischen Höhenformel Windgeschwindigkeiten tendenziell unterschätzt werden (Hau 2003).

Maßgeblich ist der Anstieg des wirtschaftlichen Potenzials durch die höhere installierte Leistung von 3 MW mit insbesondere einer stärkeren Auslastung bedingt, wie in Abb. 4.6 durch die Verschiebung der Leistungskennlinie dargestellt. Zwar erhöht sich die Nennleistung von 2,3 MW auf 3 MW um lediglich 30%, jedoch gerade im Bereich niedriger Windgeschwindigkeiten weist die Leistungskennlinie der 3 MW Turbine eine um bis zu Faktor 2,3 höhere elektrische Leistung auf, das mit einer besseren Auslastung und somit höheren Volllaststunden einhergeht. Wesentlich ist dieser Leistungsunterschied durch den größeren Rotordurchmesser zu erklären, der quadratisch in die vom Rotor überstrichene Fläche und gemäß Gl. 4.1 linear in die Leistung der Turbine einfließt. Das Verhältnis der Rotorflächen der hier berücksichtigten Turbinen entspricht 1,87.

Aufgrund dieser stärkeren Auslastung liegt der Grenzbereich zwischen wirtschaftlichem und unwirtschaftlichem Betrieb im Bereich niedrigerer mittlerer Windgeschwindigkeiten. Die folgende Abb. 4.7 zeigt die Häufigkeitsverteilung der mittleren Windgeschwindigkeiten der im Basis-Szenario ermittelten Nutzungsflächen. Eingezeichnet sind zudem die Grenzbereiche zwischen unwirtschaftlichem und wirtschaftlichem Betrieb auf Grundlage der getroffenen Annahmen zu den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen.

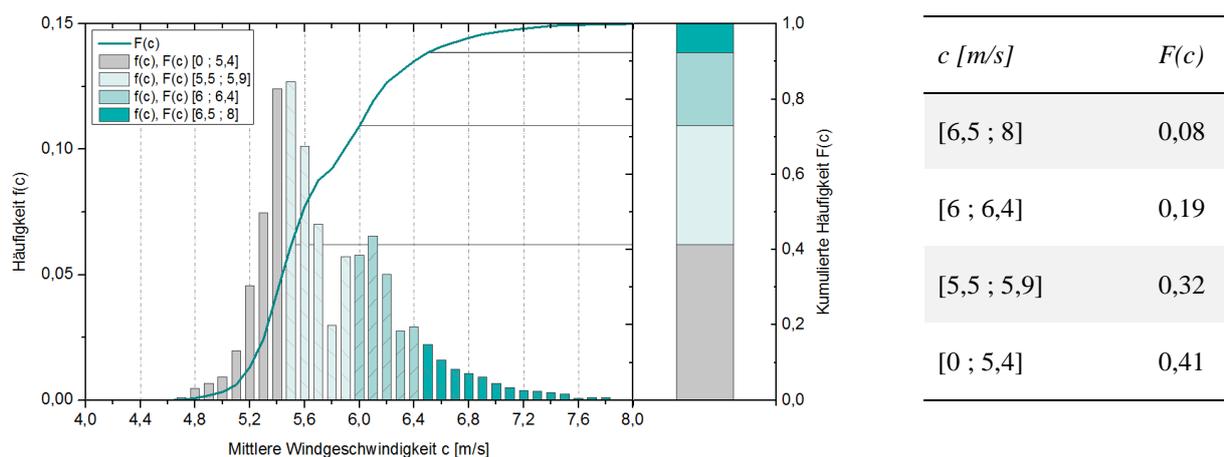


Abbildung 4.7: Häufigkeitsverteilung mittlere Windgeschwindigkeiten im Basis-Szenario

Zum Vergleich wurden die Windgeschwindigkeiten in Abb. 4.7 auf 120 m Höhe extrapoliert, das der Nabenhöhe der 3 MW Turbine entspricht. Die Grenzgeschwindigkeit bei der die 2,3 MW Turbine elektrische Energie zu Stromgestehungskosten von 9,27 ct/kWh generiert, liegt bei etwa 6,5 m/s. Aufgrund der besseren Auslastung der 3 MW Turbine, generiert diese im vorliegenden Modell elektrische Energie zu Gestehungskosten in Höhe der EEG-Vergütung bei etwa 5,5 m/s. Trotz gleicher mittlerer Windgeschwindigkeiten können die Gestehungskosten aufgrund unterschiedlicher Formparameter der Verteilungsfunktion an den einzelnen Standorten leicht abweichen, so dass diese angegebenen mittleren Windgeschwindigkeiten lediglich als Orientierung dienen.

Deutlich zu erkennen ist, dass der Grenzbereich bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 6,5 m/s im Randbereich der Verteilung liegt. Eine Verringerung dieser Geschwindigkeit führt zu einem exponentiellen Anstieg der kumulierten Häufigkeit. Insgesamt beträgt die kumulierte Häufigkeit im

Intervall $[6,5 ; 8]$ 0,08. Die Verringerung der mittleren Windgeschwindigkeit auf 5,5 m/s führt zu einem Anstieg der kumulierten Häufigkeit auf 0,59 (Intervall $[5,5 ; 8]$). In Summe führt dies zu einem starken Anstieg des wirtschaftlichen Potenzials.

5 Photovoltaik

5.1 GIS-gestützte Ermittlung und Analyse von Freiflächen

Solarstrahlung

Für die Berechnung des technischen Potenzials ist es erforderlich, die lokale Solarstrahlung zu kennen. Dabei lässt sich Solarstrahlung unterscheiden in direkte und diffuse Solarstrahlung, welche in Summe die Globalstrahlung bilden. Die Globalstrahlungswerte wurden von SOLEMI (MESoR 2013) bereitgestellt. Solar Energy Mining (SOLEMI) ist ein Service der vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt eingerichtet wurde. Dabei werden METEOSAT Daten aufbereitet und bereitgestellt. Als Strahlungsarten stehen horizontale solare Strahlung sowie Direktnormalstrahlung zur Verfügung.

Die zeitliche Auflösung der Solarstrahlungswerte, welche für das Jahr 2005 erhoben wurden, beträgt eine Stunde. Da die solare Strahlung über die Jahre nur in geringem Umfang schwankt (Kaltschmitt 2003), ist diese zur Berechnung der technischen Potenziale geeignet. Die verfügbaren Daten besitzen eine geographische Auflösung von zehn Bogenminuten, was für Deutschland in etwa 18 km entspricht. In Summe werden bei der Potenzialanalyse somit 262 Punkte mit unterschiedlichen Strahlungswerten berücksichtigt.

Dachflächen

Als weitere Eingangsgröße sind die Dachflächen zu bestimmen auf denen Solarmodule installiert werden können. Im Rahmen dieser Potenzialbestimmung werden nur Dachflächen für Photovoltaikanlagen analysiert. Entsprechend wird angenommen, dass ein Zubau auf allen geeigneten Dächern, d.h. Neigung und Ausrichtung sind geeignet, auch realisiert wird. Mittels einer GIS Analyse werden diese Dachflächen ermittelt. Als Datengrundlage dient hierbei das Openstreetmap Projekt (Geofabrik 2013). Dadurch wird es ermöglicht für einzelne Gebäude Solarpotenziale zu berechnen und diese Solarpotenziale auf unterschiedliche Verwaltungs- oder Stadtbezirke zu aggregieren.

Dachneigung

Der tatsächliche Stromertrag einer Solaranlage ist abhängig von der Ausrichtung der Dachfläche Richtung Süden sowie von der Neigung der Dachfläche. Durch optimale Ausrichtung sowie Neigung der Solarzelle können Reflexionsverluste minimiert werden. Zur Bestimmung der Neigung sowie Ausrichtung wurden Daten von dem Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (2013) verwendet. Diese Daten wurden mittels Laservermessung erhoben und gelten für die Stadt Kamenz in Sachsen.⁴ Mithilfe der Laservermessungsdaten wird eine Verteilungsfunktion generiert und diese auf alle Dachflächen in Sachsen angewendet. Dabei beinhalten die Verteilungsfunktion die entscheidenden Parameter Ausrichtung Richtung Süden, Neigung der Dachfläche sowie prozentualer Anteil der freiverfügbaren Dachfläche.

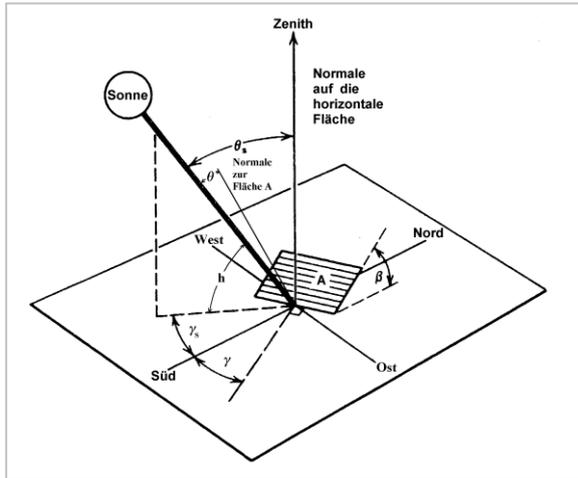
5.2 Energiewandlung

Für das technische Potenzial sind die beiden Parameter mögliche installierte Leistung L_n und solare Strahlung zu bestimmen.

⁴ Es wurde angenommen, dass die Verteilung der Dachflächen der Stadt Kamenz repräsentativ ist und somit für alle Dachflächen des Freistaates Sachsens gelten.

Die mögliche installierte Leistung der Solarmodule L_n ist dabei abhängig von der verfügbaren Fläche A_n sowie dem Wirkungsgrad μ des Solarmoduls. Die Solarkonstante C dient dabei der Normung der Solarmodule und ist mit 1.000 kW je m² festgelegt.

$$L_n = C \cdot A_n \cdot \mu \quad 5.1$$



Die *Solare Strahlung* (n, θ) auf der geneigten Fläche wird durch die Gleichung 5.2 bestimmt. Dabei steht n für den jeweiligen Standort und θ für den Zenitwinkel. Der Zenitwinkel θ ist dabei abhängig von dem Winkel β , welcher die Neigung der Dachfläche angibt, dem Winkel γ , welcher die Ausrichtung des Gebäudes Richtung Süden bestimmt und dem Winkel h , der die Sonnenhöhe angibt. Die Abb. 5.1 veranschaulicht die Beziehung von geneigter Dachfläche zu den jeweiligen Winkeln.

Abbildung 5.1: Einstrahlungsrichtung der Direktstrahlung auf eine beliebig orientierte Fläche A (Badea (2013))

Der Parameter $G_{0,n}$ gibt die horizontale solare Einstrahlung am Standort n an.

$$\text{Solare Strahlung}(n, \theta) = G_{0,n} \cdot \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad 5.2$$

Das technische Potenzial E_n lässt sich dann über die Beziehung 5.3 ermitteln, wobei der Parameter ϑ Systemverluste, wie z.B. Verluste im Wechselrichter, berücksichtigt.

$$E_n = L_n \cdot \text{Solare Strahlung}_n \cdot \vartheta \quad 5.3$$

5.3 Technische und wirtschaftliche Parameter

Die folgende Tab. 5.1 fasst die Annahmen bezüglich der technischen und wirtschaftlichen Parameter zusammen, die zur Bestimmung des PV-Ertrages sowie der Stromgestehungskosten verwendet werden.

Tabelle 5.1: Technische und wirtschaftliche Parameter Photovoltaik

Wirkungsgrad Solarmodul	μ	0,16	Solarwatt 2013
Systemverluste PV System	ϑ	0,15	Scholz 2010
Sonnenhöhenwinkel	γ	38°	Kaltschmitt 2003
Spezifische Investitionen	I_0 [EUR/kWp]	1700	Kost et al. 2012
Fixe spezifische Betriebskosten	A_t [EUR/kWp \times a]	30	Kost et al. 2012
Laufzeit	n [a]	20	Kost et al. 2012
WACC ⁵	i	0,044	Kost et al. 2012
Steigerung der Betriebskosten	[%]	2	Kost et al. 2012
Jährliche Degression Stromerzeugung	[%]	0,2	Kost et al. 2012
Konverteraustausch	n [a]	12	Kost et al. 2012
Investitionen Konverter	I_{INV} [EUR/kWp]	180	Nold et al. 2012

5.4 Ergebnisse

5.4.1 Kostenpotenzialkurven Sachsen

Die folgende Abb. 5.2 stellt die berechneten Kostenpotenzialkurven für Solarenergie im Freistaat Sachsen für die gebildeten Szenarien dar. Dabei ist zu beachten, dass bei der Potenzialanalyse ausschließlich Photovoltaikmodule auf Dachflächen als Zubauoptionen berücksichtigt wurden. In der gesamten Analyse werden sowohl Photovoltaikfreiflächenanlagen sowie Nutzungskonflikte zwischen Solarthermie und Dachflächenphotovoltaikanlagen nicht betrachtet, da diesen Technologien in Zukunft nur eine geringe Rolle am Energiemix in Deutschland zugesprochen wird.

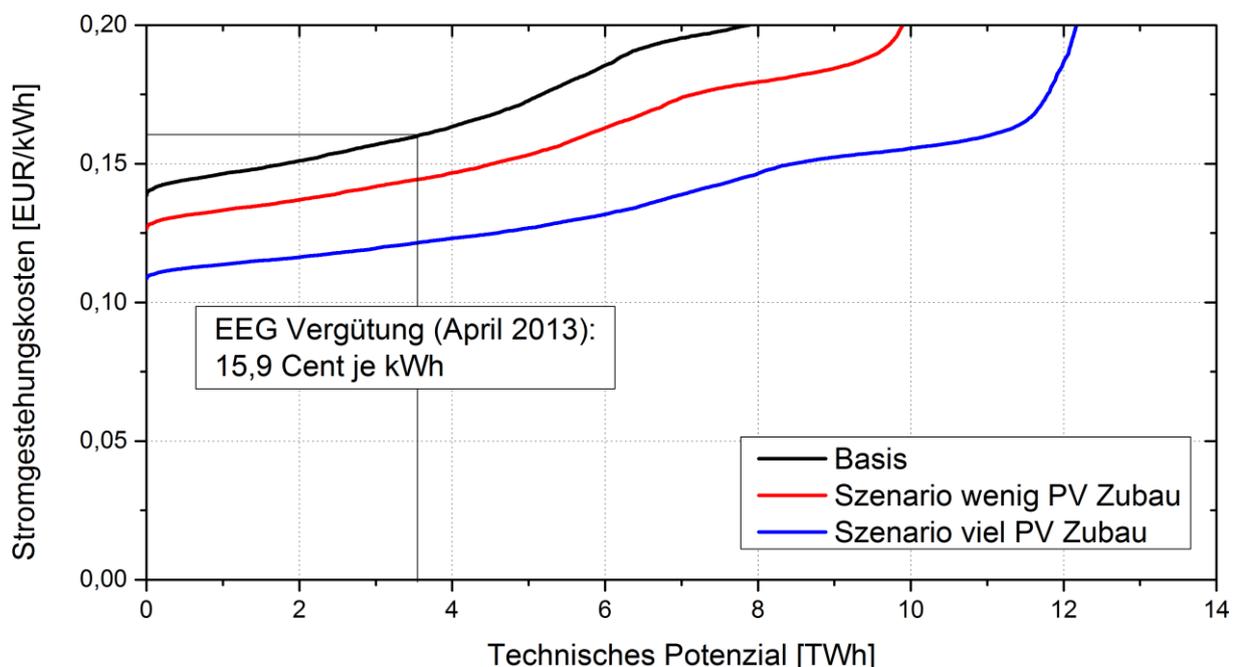


Abbildung 5.2: Kostenpotenzialkurven Photovoltaik

⁵ Weighted Average Cost of Capital (Engl.) = mittlere Kapitalkosten

Die kumulierten Jahresenergieerträge variieren zwischen 9,4 TWh im Basis-Szenario und 12,78 TWh in dem Szenario mit viel PV Zubau. Es zeigt sich, dass zum einen die Stromgestehungskosten fallen und zum anderen, dass das technische Potenzial ansteigt. Die Stromgestehungskosten fallen durch die fallenden Modulpreise, während sich das Potenzial aufgrund des steigenden Systemwirkungsgrades erhöht. Von besonderer Relevanz für die Installation von PV-Systemen sind die geltenden Vergütungssätze des EEG sowie der Strombezugspreis für private Haushalte. Der aktuelle Vergütungssatz für PV Kleinanlagen (Stand April 2013) beträgt 15,9 Cent je kWh. Legt man diesen Vergütungssatz als Grenze fest, so beträgt das wirtschaftliche Potenzial in Sachsen 3,47 TWh.

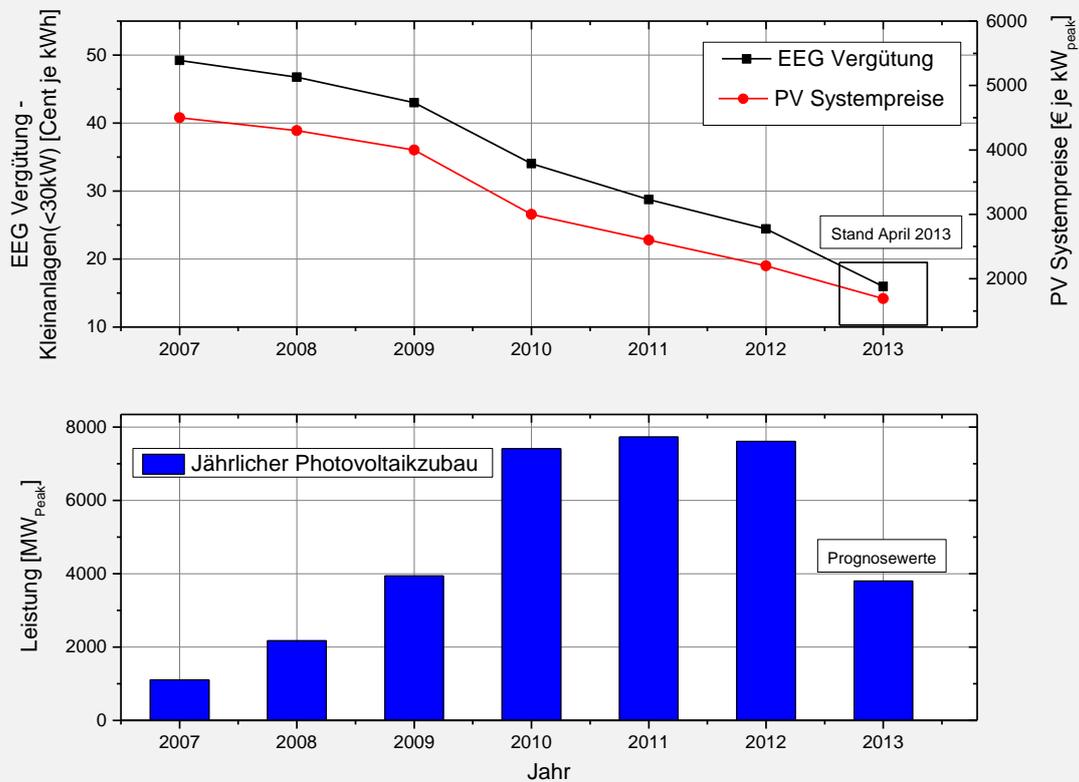
Eine Besonderheit der Photovoltaik ist die Möglichkeit des Eigenverbrauchs lokal erzeugter Elektrizität. Dieses Potenzial ist abhängig von dem aktuellen Strompreis und der tatsächlich verbrauchten Energiemenge. Da die lokale Stromnachfrage sowie die lokale Stromerzeugung aus Photovoltaiksystem über den Jahres- sowie Tagesverlauf sehr stark variiert, ist für die Abschätzung dieses Potenzials eine zeitlich fein aufgelöste Analyse notwendig. Im Rahmen dieser Arbeit wird allerdings der Eigenstromverbrauch nicht analysiert.

In Tab. 5.2 sind die technischen und die wirtschaftlichen Potenziale für Photovoltaiksysteme in Sachsen dargestellt. Das wirtschaftliche Potenzial wurde wie bereits dargestellt mittels der aktuellen EEG Vergütung (Stand April 2013) für Photovoltaik Kleinsysteme ermittelt. Der Verlauf der EEG Vergütung für Photovoltaiksysteme ist schwer abzuschätzen (siehe Exkurs) und daher werden hierfür keine Prognosewerte angenommen.

Tabelle 5.2: Wirtschaftliche und Technische Potenziale für Photovoltaiksysteme in Sachsen

<i>Szenario</i>	<i>Wirtsch. Potenzial [TWh]</i>	<i>Techn. Potenzial [TWh]</i>
Basis	3,47	9,40
Szenario - Wenig PV Zubau	5,73	10,80
Szenario - Viel PV Zubau	10,08	12,78

Exkurs: Zubau Photovoltaiksysteme und das Lernkurvenkonzept



(Quelle: BSW, EuPD Research)

Die Abbildung zeigt den jährlichen Photovoltaikzubau und die Preisdegression der Photovoltaiksysteme. Um Aussagen über den weiteren Verlauf der Preisdegression machen zu können, wird in der Wissenschaft das **Lernkurvenkonzept** verwendet.

Das **Lernkurvenkonzept** kombiniert die kumuliert produzierten Mengen (bezogen auf das globale Marktvolumen) mit den Produktionskosten des Produktes. Anhand historischer Marktbeobachtungen ist es möglich die Lernrate zu ermitteln. Eine Verdoppelung der Produktionsmengen und gleichzeitigem Absinken der Produktionskosten um 30% entspricht einer Lernrate von 30%. Mithilfe der historisch ermittelten Lernrate lassen sich dann Aussagen über die Produktionskosten in der Zukunft erstellen. Die Betrachtung bezieht sich hierbei in der Regel auf das globale Marktvolumen.

5.4.2 Jahresenergieerträge und Stromgestehungskosten auf Stadt- und Landkreis-Ebene

Abbildung 5.3 stellt die Jahresenergieerträge auf Stadt- und Landkreis-Ebene als Säulendiagramm dar. Hervorzuheben sind die drei größten Städte des Freistaates Sachsen Chemnitz, Leipzig sowie Dresden, welche die höchsten Jahresenergieerträge aufweisen. Der Zuwachs über die einzelnen Szenarien an den Jahresenergieerträgen fällt relativ gering aus und ist ausschließlich durch den technologischen Fortschritt begründet.

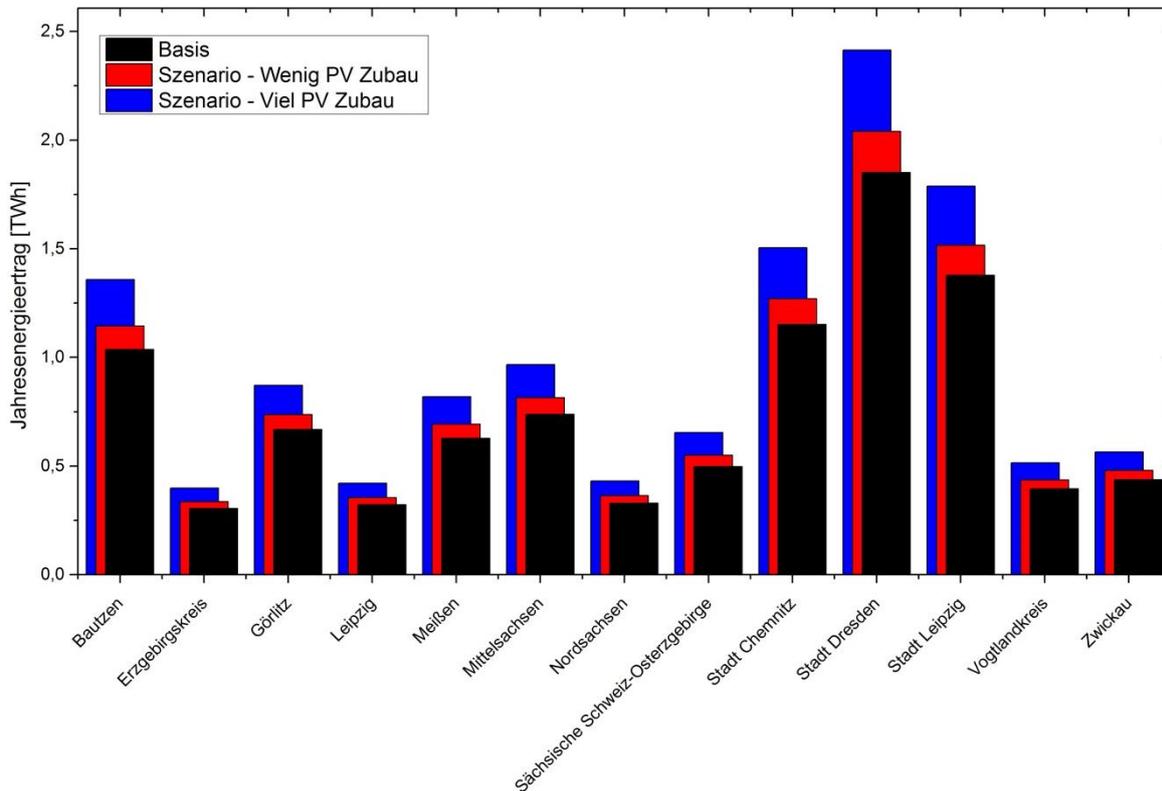


Abbildung 5.3: Technisches Potenzial auf Landkreis- und Stadt-Ebene

Die ertragsgewichteten mittleren Stromgestehungskosten für Photovoltaik, unter Berücksichtigung des gesamten technischen Potenzials in Sachsen, variieren zwischen 19 und 20 Cent je kWh im Basis-Szenario. In dem Szenario „Wenig PV Zubau“ sinken sie auf ein niedrigeres Niveau zwischen 17,3 und 18,3 Cent je kWh. In dem Szenario „Viel PV Zubau“ sinkt das Niveau auf einen Bereich zwischen 14,9 und 15,9 Cent je kWh. Zwischen den einzelnen Landkreisen fällt der Unterschied mit ca. 1 Cent je kWh sehr gering aus, dies beruht maßgeblich auf der Mittelwertbildung. Der geringe Unterschied zwischen den Landkreisen ist ausschließlich auf die unterschiedliche Globalstrahlung in den Landkreisen zurückzuführen. Durch fallende Systempreise sinken die mittleren Stromgestehungskosten entsprechend. Dabei fällt auf, dass die Struktur der mittleren Stromgestehungskosten identisch bleibt und das Niveau der mittleren Stromgestehungskosten für alle Landkreise mit dem gleichen Verhältnis sinkt.

5.4.3 Jahresenergieerträge und Stromgestehungskosten auf Gemeinde-Ebene

Eine genauere Aussage über wirtschaftliche Potenziale und Gestehungskosten kann getroffen werden, wenn die Gemeinden des Freistaates Sachsens im Einzelnen betrachtet werden. Hier werden Energieerträge und Gestehungskosten in Abhängigkeit analysiert unter Berücksichtigung des wirtschaftlichen Potenzials. Als Grenze für das wirtschaftliche Potenzial wird die EEG-Vergütung in Höhe von 9,27 Cent je kWh herangezogen. Abbildung 5.4 stellt die Jahresenergieerträge über den Stromgestehungskosten der einzelnen Gemeinden für das Basis-Szenario dar. Für die weiteren Szenarien wird analog vorgegangen.

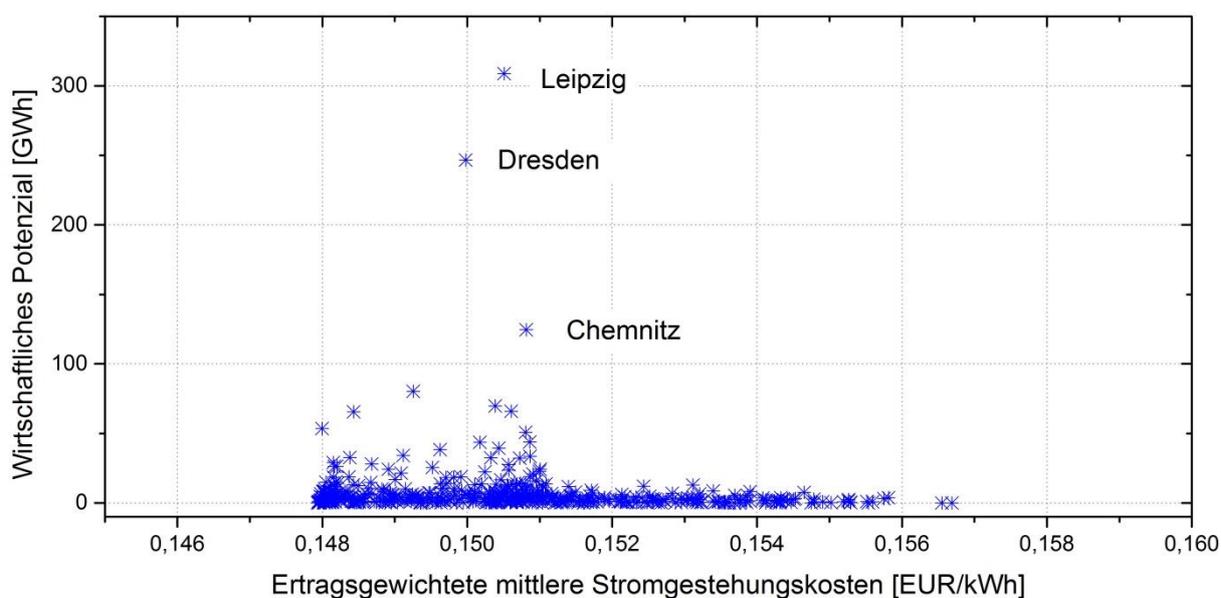


Abbildung 5.4: Jahresenergieerträge und Gestehungskosten auf Gemeinde-Ebene

In Abb. 5.4 wird ersichtlich, dass die Städte Leipzig, Dresden sowie Chemnitz die höchsten Potenziale für Photovoltaik besitzen. Die geringsten mittleren Stromgestehungskosten liegen bei 14,78 Cent je kWh und die höchsten mittleren Stromgestehungskosten liegen bei 15,68 Cent je kWh. Allerdings sind die Jahresenergieerträge für Photovoltaik in diesen Gemeinden relativ gering. Die geringen Unterschiede der mittleren Stromgestehungskosten in Höhe von 0,9 Cent je kWh sind ausschließlich auf die verschiedenen Werte der Globalstrahlung an diesen Standorten zurückzuführen.

Die folgende Tab. 5.3 fasst alle fünf Gemeinden mit dem größten technischen Potenzial nach Gl. 4.10 der einzelnen Szenarien zusammen. Zudem werden die entsprechenden Jahresenergieerträge und ertragsgewichtete mittlere Gestehungskosten ausgewiesen. Die mittleren Stromgestehungskosten beinhalten alle möglichen Standorte innerhalb der Gemeinde. Somit liegen die mittleren Stromgestehungskosten oberhalb der EEG Vergütung in Höhe von 15,9 Cent je kWh, da auch unwirtschaftliche Standorte in dieser Auswertung mit aufgenommen sind.

Tabelle 5.3: Größtes technisches Potenzial und geringste Gestehungskosten auf Gemeinde-Ebene

	<i>Gemeinde</i>	<i>Landkreis</i>	<i>Jahresenergieertrag [GWh]</i>	<i>STGK, gewichtet [ct/kWh]</i>
<i>Basis</i>	Leipzig	Leipzig	823	19,30
	Dresden	Dresden	647	19,22
	Chemnitz	Chemnitz	430	19,67
	Radebeul	Dresden	209	19,00
	Bannewitz	Dresden	208	19,68
<i>Moderater Zubau</i>	Leipzig	Leipzig	907	17,62
	Dresden	Dresden	712	17,55
	Chemnitz	Chemnitz	475	17,96
	Radebeul	Dresden	230	17,35
	Bannewitz	Dresden	230	17,97
<i>Starker Zubau</i>	Leipzig	Leipzig	1072	15,11
	Dresden	Dresden	839	15,04
	Chemnitz	Chemnitz	561	15,39
	Bannewitz	Dresden	274	15,40
	Radebeul	Dresden	237	14,87

Der Landkreis Dresden weist in allen Szenarien die meisten Gemeinden auf, die über große wirtschaftliche Potenziale bei geringen Gestehungskosten verfügen. Ebenso bestätigen sich die Ergebnisse hinsichtlich der Städte Leipzig sowie Chemnitz.

Abbildung 5.5 veranschaulicht die Jahresenergieerträge auf Gemeinde-Ebene für den Freistaat Sachsen. Deutlich ersichtlich sind die lokalen Unterschiede in Sachsen bezüglich der Jahresenergieerträge. In städtischen Gebieten ist mit deutlich höheren Jahresenergieerträgen zu rechnen als in ländlichen Regionen.

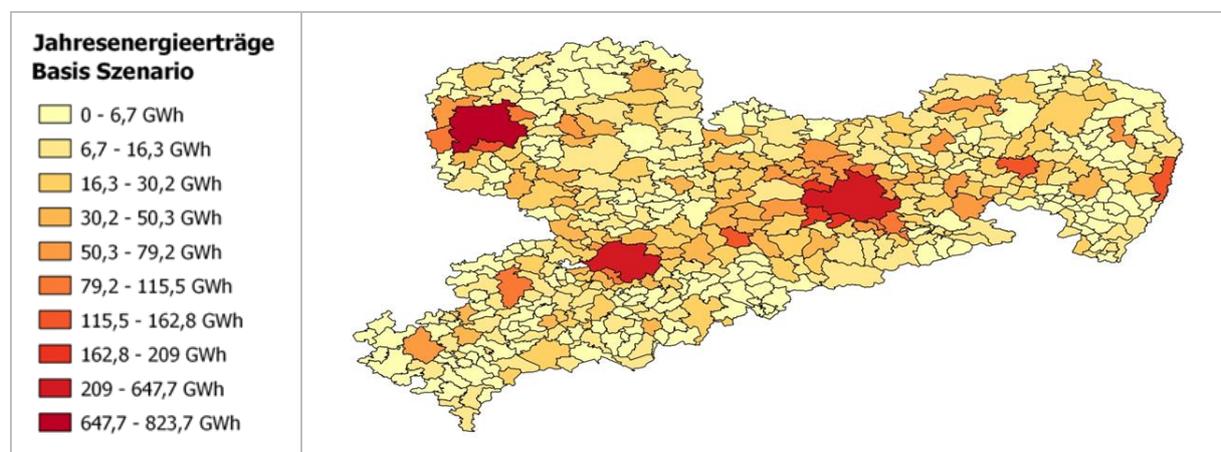


Abbildung 5.5: Jahresenergieerträge Gemeinde-Ebene

6 Landwirtschaftliche Biomasse

Bei der Ermittlung des technischen Potenzials an Biomasse können unterschiedliche Nutzungspfade unterschieden werden. Schwerpunkt dieser Potenzialstudie bildet Biomasse aus der Produktion landwirtschaftlicher Erzeugnisse. Berücksichtigt werden dabei die in der folgenden Abb. 6.1 dargestellten Nutzungspfade mit Endenergienutzung in den Sektoren Elektrizität und Mobilität. Zwischen einzelnen Nutzungspfaden bestehen Konkurrenzen. Im Folgenden werden daher Potenziale an Biomasse zur Bereitstellung von Endenergie in den genannten Sektoren je Nutzungspfad ermittelt und ausgewiesen, so dass etwaige Konkurrenzen unberücksichtigt bleiben.

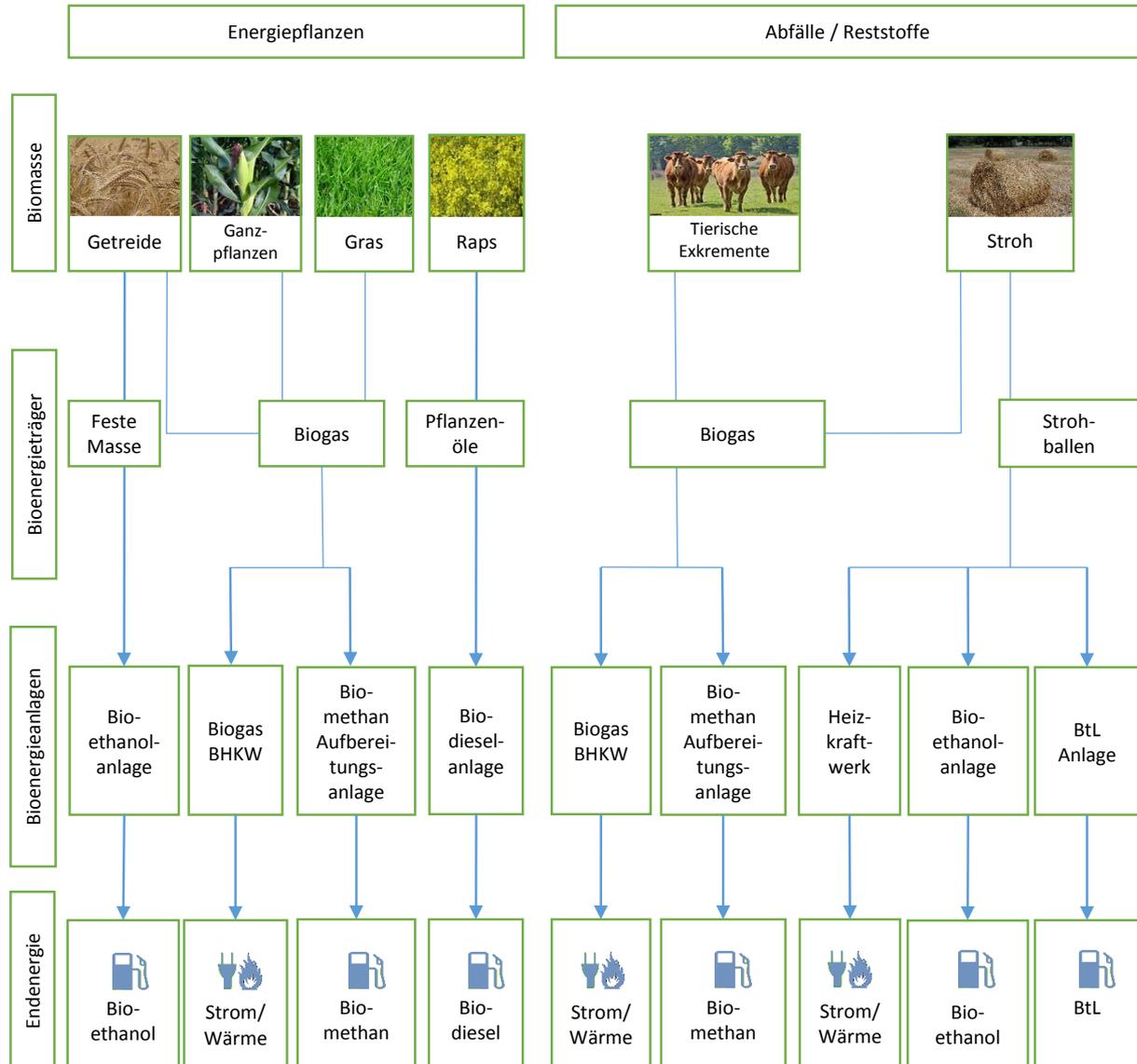


Abbildung 6.1: Nutzungspfade landw. Biomasse in den Sektoren Elektrizität und Mobilität (AEE 2013)

6.1 Theoretisches und technisches Potenzial an Biogas im Freistaat Sachsen

6.1.1 Biogasproduktion aus Tierexkrementen

Derzeit installierte Fermentationsanlagen zur Biogasproduktion im Freistaat Sachsen arbeiten zu großen Teilen auf Basis von Exkrementen (FNR 2010). Dabei werden nur geringfügig Kofermente zugeführt. Für die Potenzialermittlung werden die Tierbestände nach Rindern und Schweinen unterschieden. Grundlage für die Berechnungen des Volumens an tierischen Exkrementen sind die Tierbestände nach dem Statistischen Bericht 2012, die Viehwirtschaft in Sachsen (Statistisches Landesamt Sachsen 2012a).

Der Anfall an organischer Substanz für die Gasausbeute unterscheidet sich bei den Tierarten. Die beiden Tierkategorien werden getrennt berechnet. Die Tierbestände werden in eine Einheitsgröße für Nutztiere, die Großvieheinheit (GV), umgerechnet. Eine Großvieheinheit entspricht einer Lebendmasse von 500 kg.

Das Volumen an tierischen Exkrementen $V_{Gülle}$ [m³] in Abhängigkeit des Tierbestandes

$$V_{Gülle} = GV \cdot v_{GV} \quad 6.1$$

wird über den volumenspezifischen Gülleanfall v_{GV} je Großvieheinheit [m³/GV] und der Anzahl an Tieren in Großvieheinheiten berechnet.

Für die Berechnung des Methanertrages $V_{CH_4}^{Gülle}$ wird die Exkrementenmenge $V_{Gülle}$ in die Masseinheit Tonne umgerechnet. Es wird angenommen, dass Gülle aufgrund des hohen Wasseranteils eine Dichte von einer Tonne pro Kubikmeter aufweist.

Mithilfe des volumenspezifischen Methanertrages aus Gülle $v_{Gülle}$ [m³/t] wird aus der Masse an Exkrementen $M_{Gülle}$ [t] der Methanertrag [m³]

$$V_{CH_4}^{Gülle} = M_{Gülle} \cdot v_{Gülle} \quad 6.2$$

ermittelt.

Mit dem Methanertrags $V_{CH_4}^{Gülle}$ [m³] aus Gülle und dem Heizwert H_{CH_4} von Methan (9,97 kWh/m³) kann das theoretische Potenzial [kWh] an Biogas aus Exkrementen von Rinder- und Schweinebeständen

$$E_{Gülle}^{theor} = V_{CH_4}^{Gülle} \cdot H_{CH_4} \quad 6.3$$

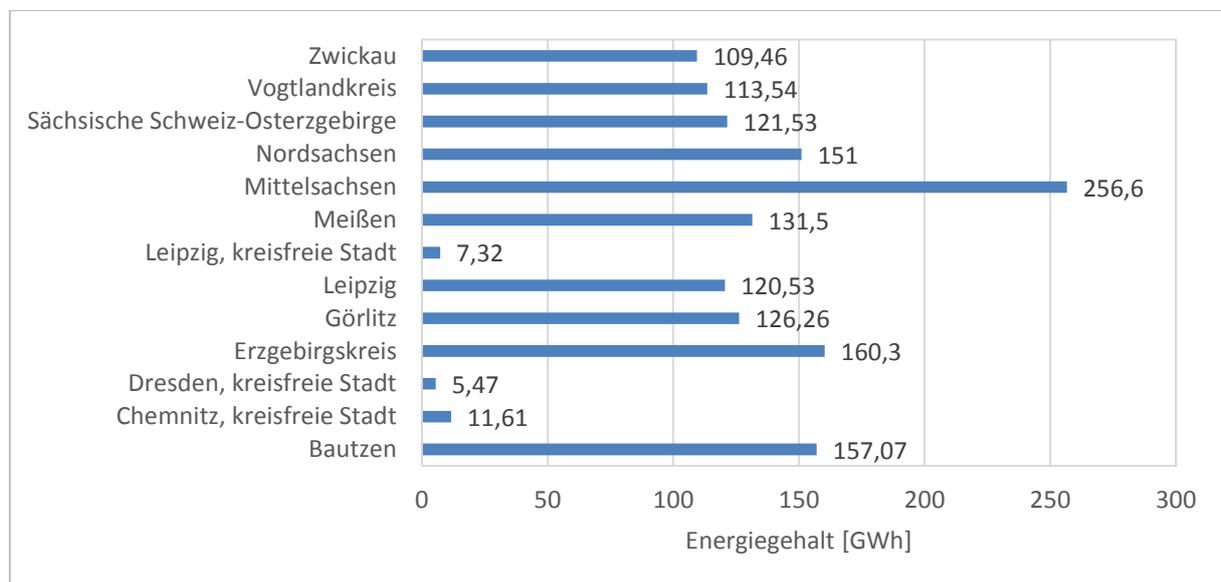
abgeschätzt werden.

In der folgenden Tab. 6.1 werden die Berechnungsergebnisse für den Rinder- und Schweinebestand im Freistaat Sachsen dargestellt.

Tabelle 6.1: Technisches Potenzial an Biogas aus Rinder- und Schweineexkrementen auf Landes-Ebene

	Anzahl	GV ⁶	Gülleanfall ⁷ [m ³ /GV]	Gülmengende [t]	Spez. Methanertrag ⁸ [m ³ /t]	Technisches Potenzial [TWh]
Rinder	498.728	396.899	18	7.144.182	17	1,21
Schweine	642.057	1.45.620	15	2.184.300	12	0,26

Die regionale Verteilung des technischen Biogaspotenzials von Tierexkrementen aus der Rinder- und Schweinehaltung wird in der folgenden Abb. 6.2 dargestellt. Dabei zeigen sich die größten Potenziale in den Landkreisen Mittelsachsen, Bautzen und im Erzgebirgskreis, die auch die größten Tierbestände aufweisen.

**Abbildung 6.2: Technisches Potenzial an Biogas aus Rinder- und Schweineexkrementen auf Landkreis-Ebene**

Im Zeitraum 2000 bis 2012 ist der Tierbestand an Rindvieh sowie Schweinen in der Landwirtschaft um etwa 12% zurückgegangen (Statistisches Landesamt Sachsen 2012a). Setzt sich diese Entwicklung fort, ist mit einem geringeren technischen Potenzial in den zukünftigen Jahren zu rechnen.

6.1.2 Biogasproduktion aus Dauergrünland

Als Dauergrünland werden im Folgenden alle Flächen mit Grasbewuchs und Bewuchs an krautigen Pflanzen als Dauerkultur bezeichnet. Flächen mit Dauergrünland werden durch Viehbestände beweidet oder durch Mähen geerntet. In Sachsen wird eine nahezu konstante Fläche seit 1999 von etwa 184.000 ha als Dauergrünland genutzt (Statistisches Landesamt Sachsen 2012b).

⁶ EU-Agrarstatistik (Verordnung (EG) Nr. 1200/2009)

⁷ Kaltschmitt et al. (2009)

⁸ Biomasse Verordnung (2001)

Grundlage der Ernteberechnung ist der mittlere Ernteertrag für Feldgras und Grasanbau im Jahre 2012 in Sachsen nach den Angaben des Statistischen Landesamtes Sachsen (2013b). Ausgehend von einem mittleren Ernteertrag von 8,0 t/ha Trockensubstanz (TS) können auf diesen Flächen bis zu 1.474.000 t getrocknete Futtergräser pro Jahr geerntet werden. Die ertragsreichsten Landkreise sind der Erzgebirgskreis, Landkreis Mittelsachsen und der Landkreis Sächsische Schweiz-Osterzgebirge (Statistisches Landesamt Sachsen 2012b).

Die technischen Potenziale an Dauergrünlandflächen für die Energiegewinnung weichen regional stark voneinander ab. Eine ausführliche Darstellung und Berechnung findet sich in der Studie Umweltgerechter Anbau von Energiepflanzen von Feldwisch (2011). Feldwisch arbeitet einen Grünlandanteil von 23% heraus, der als Überschussfläche für die Produktion von Biogas zur energetischen Nutzung im Freistaat Sachsen zur Verfügung steht.

Ernteerträge aus diesen Überschussflächen können als Festbrennstoff oder in einer Biogasanlage zur Biogasgewinnung genutzt werden. Ausgehend von der Erntemenge M_{Heu} [t] an Heu und dem Heizwert für Heu H_{Heu} [MJ/t] in Höhe von 14,4 MJ/kg wird das technische Potenzial [MJ]

$$E_{Heu}^{tech} = M_{Heu} \cdot H_{Heu} \quad 6.4$$

für die Nutzung als Festbrennstoff ermittelt.

Das technische Potenzial [kWh] an Biogas aus der Heuproduktion

$$E_{Heu}^{tech} = M_{Heu} \cdot v_{Heu} \cdot H_{CH_4} \quad 6.5$$

wird aus der Erntemenge M_{Heu} [t], dem volumenspezifischen Methanertrag von Heu v_{Heu} [m³/t] in Höhe von 100 m³/t und dem Heizwert H_{CH_4} von Methan (9,97 kWh/m³) berechnet.

In der folgenden Tab. 6.2 werden das theoretische und das technische Potenzial an Biogas sowie Festbrennstoff aus Dauergrünlandflächen vergleichend gegenübergestellt.

Tabelle 6.2: Theoretisches und technisches Potenzial an Biogas und Festbrennstoff aus Dauergrünlandflächen auf Landes-Ebene

Grünlandfläche 184.222 ha	Theoretisches Potenzial		Technisches Potenzial (23% Überschussfläche)	
	Festbrennstoff	Biogas	Festbrennstoff	Biogas
Ernteertrag [t]	1.473.776		338.968	
Energiegehalt [TWh]	5,89	1,47	1,36	0,34

Aus den vorhandenen Überschussflächen im Jahre 2012 zur Heuproduktion besteht ein technisches Potenzial von 1,36 TWh zur Nutzung als Festbrennstoff bzw. 0,34 TWh bei Biogasproduktion.

Überschussflächen an Dauergrünland sind in Sachsen sehr differenziert vorhanden. Abbildung 6.3 stellt das technische Potenzial an Dauergrünland zur Biogasproduktion dar.

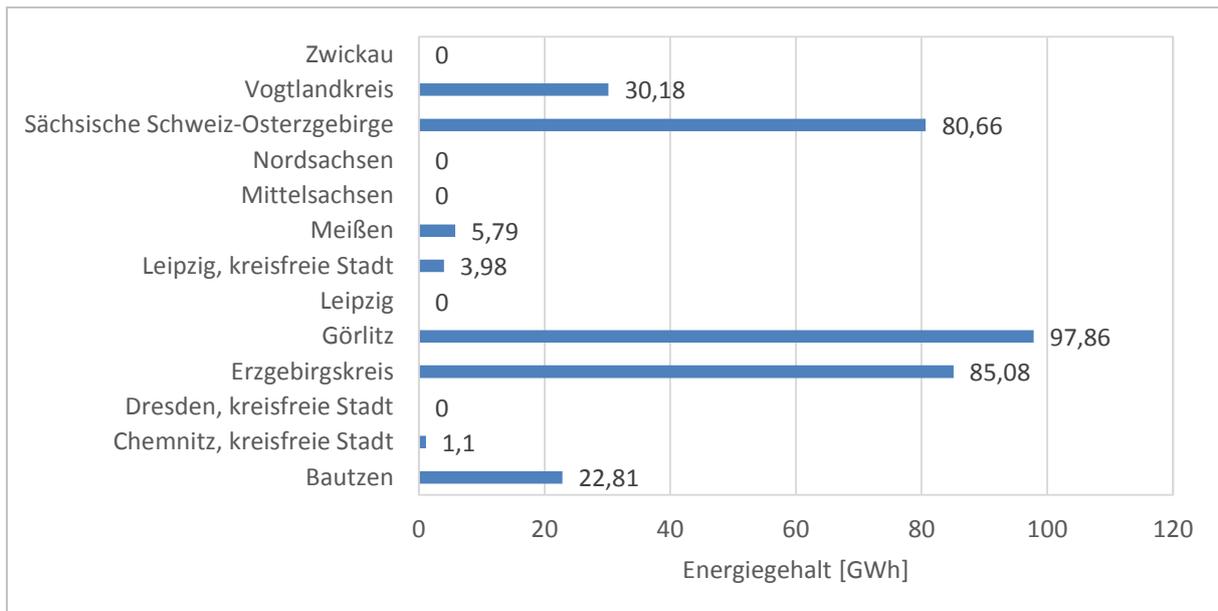


Abbildung 6.3: Technisches Potenzial an Biogas aus Dauergrünland auf Landkreis-Ebene

Nach Feldwisch (2011) fallen die Grünlandernteerträge in den einzelnen Landkreisen sehr unterschiedlich aus. Während über 95% der Erträge in den Landkreisen Vogtlandkreis, Sächsische Schweiz-Osterzgebirge, Görlitz, Erzgebirgskreis und Bautzen anfallen, besteht in den Landkreisen Mittelsachsen, Zwickau, Nordsachsen, Leipzig und Stadt Dresden ein Defizit an Grünlandernteerträgen. In diesen Landkreisen ist der Futterbedarf des Viehbestandes höher, als das Angebot aus vorhandenen Grünlandflächen.

6.1.3 Biogasproduktion aus Getreide- und Rapsstroh

In der Landwirtschaft fallen durch die Produktion, Ernte und Verarbeitung von Getreide und Raps die Substrate Getreidestroh und Rapsstroh an. Diese Substrate können vielfältig zur energetischen Nutzung weiterverarbeitet werden. Neben der Verwendung als Festbrennstoff zur Wärmeengewinnung kann es bspw. in einen gasförmigen Energieträger konvertiert und in Biogasanlagen verstromt werden oder aber auch in der Kraftstoffproduktion zu einem flüssigen Energieträger weiterverarbeitet werden (Biomass to liquid (Btl)).

Die strohliefernden Anbaukulturen Getreide und Raps wurden in Sachsen im Jahre 2012 auf rund 500.000 ha angepflanzt. Dabei werden die Anbauflächen für Weizen (alle Sorten), Roggen, Triticale, Gerste und Hafer als Getreide zusammengefasst (Statistisches Landesamt Sachsen 2012b).

Die Erntemenge M_{Stroh} [t] an Stroh

$$M_{Stroh} = m \cdot A \cdot f_{KornStroh} \quad 6.6$$

wird über den mittleren Ernteertrag m [t/ha], der Anbaufläche A [ha] und dem Koeffizienten $f_{KornStroh}$ der das fruchtartsspezifische Korn-Stroh-Verhältnis beschreibt, von Getreide und Raps, ermittelt.

Es kann nicht das gesamte Strohaufkommen energetisch genutzt werden. Ein Teil des Getreidestrohs bleibt zur Humusbildung und als Erosionsschutz auf der Anbaufläche. Weiterhin wird Getreidestroh als Einstreumaterial und Futtermittel genutzt. In der Studie Landwirtschaftliche Biomasse-Potenziale an

Biomasse aus der Landwirtschaft des Freistaates Sachsen zur stofflich-energetischen Nutzung des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2006) werden die verfügbaren Potenziale an Stroh regional differenziert dargestellt.

Münch (2008) vergleicht in ihrer Arbeit Nachhaltigkeit nutzbares Getreidestroh in Deutschland verschiedene Studien bezüglich der Nutzung von Getreidestroh als Energieträger. Die Ergebnisse fallen sehr unterschiedlich aus. Der Anteil an Getreidestroh zur energetischen Nutzung variiert in den Studien zwischen 10% und 60% des gesamten Strohaufkommens. Im Folgenden wird analog zu Münch ein Anteil von Stroh zur energetischen Nutzung in Höhe von 33% angenommen. Abhängig von den regionalen sowie fruchtfolgespezifischen Anbaucharakteristika variiert der Strohanteil, der vom Feld abgefahren werden kann, so dass eine genaue Bestimmung dieses Strohanteils nur mit Unsicherheit erfolgen kann.

Ausgehend von der Erntemenge M_{Stroh} [t] an Stroh und dem Heizwert für Stroh H_{Stroh} [MJ/t] in Höhe von 14,3 MJ/kg wird das technische Potenzial [MJ]

$$E_{Stroh}^{tech} = M_{Stroh} \cdot H_{Stroh} \quad 6.7$$

der Nutzung von Stroh als Festbrennstoff ermittelt.

Das technische Potenzial [kWh] zur Produktion von Biogas

$$E_{Stroh}^{tech} = M_{Stroh} \cdot v_{Stroh} \cdot H_{CH_4} \quad 6.8$$

berechnet sich analog aus der Erntemenge M_{Stroh} [t], dem spezifischen Methanertrag von Stroh v_{Stroh} [m³/t] in Höhe von 161m³/t und dem Heizwert H_{CH_4} von Methan (9,97 kWh/m³).

In der folgenden Tab. 6.3 wird die Erntemenge an Getreide- und Rapsstroh und das theoretische sowie technische Potenzial zur Verwendung von Stroh als Festbrennstoff bzw. zur Biogasproduktion dargestellt. Das theoretische Potenzial geht von einer vollständigen Nutzung des Getreidestrohs aus. In Sachsen betrug der gesamte Strohertrag im Jahr 2012 rund 2 Millionen t Getreidestroh und rund 870.000 t Rapsstroh. Für die Berechnung des technischen Potenzials der Erntemenge an Stroh wird mit einem Drittel der gesamten Getreide- und Strohmenge gerechnet.

Tabelle 6.3: Theoretisches und technisches Potenzial an Biogas und Festbrennstoff aus Getreide- und Rapsstroh auf Landes-Ebene

<i>Getreide- und Rapsanbaufläche</i> 4.186.130 ha	<i>Theoretisches Potenzial</i>		<i>Technisches Potenzial</i> (33% energetische Nutzung)	
	<i>Festbrennstoff</i>	<i>Biogas</i>	<i>Festbrennstoff</i>	<i>Biogas</i>
<i>Ernteertrag [t]</i>	3.056.471		1.008.635	
<i>Energiegehalt [TWh]</i>	12,41	4,91	4,01	1,62

Das technische Potenzial bei Nutzung von Getreide- und Rapsstroh als Festbrennstoff in Sachsen bezogen auf das Jahre 2012 betragen 4,01 TWh. Bei der Nutzung des Getreide- und Rapsstrohs für die Biogasproduktion ergibt sich ein technisches Potenzial von 1,62 TWh.

In Abb. 6.4 ist das technische Potenzial zur Produktion von Biogas aus Getreide- und Rapsstroh auf Landkreis-Ebene dargestellt. Über die größten Erträge an Getreide- und Rapsstroh verfügen die

Landkreise Nordsachsen, Mittelsachsen und Leipzig. Im Vergleich zu Dauergrünlandflächen sind die Anbauflächen von Getreide und Raps im Sachsen sehr viel homogener verteilt.

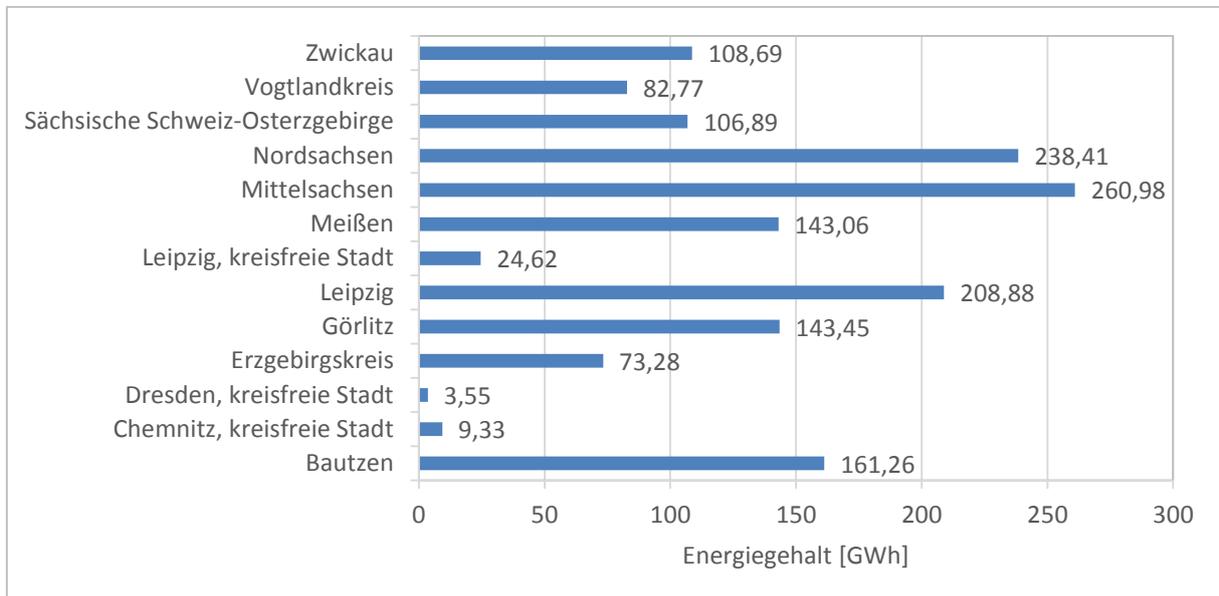


Abbildung 6.4: Technisches Potenzial an Biogas aus Getreide- und Rapsstroh auf Landkreis-Ebene

6.1.4 Biogasproduktion aus Anbaukulturen auf Ackerflächen

In Sachsen wird eine Fläche von 719.000 ha für den Anbau landwirtschaftlicher Kulturen genutzt. Den Hauptanteil bei den Anbauprodukten nahm 2012 das Getreide mit 56% ein, gefolgt von Raps mit 19% und Pflanzen zur Grünernte mit 18% (Statistisches Landesamt Sachsen 2012b). Abbildung 6.5 zeigt die wesentlichen Anbaukulturen und deren Anteil auf Ackerflächen des Freistaates Sachsen im Jahre 2012.

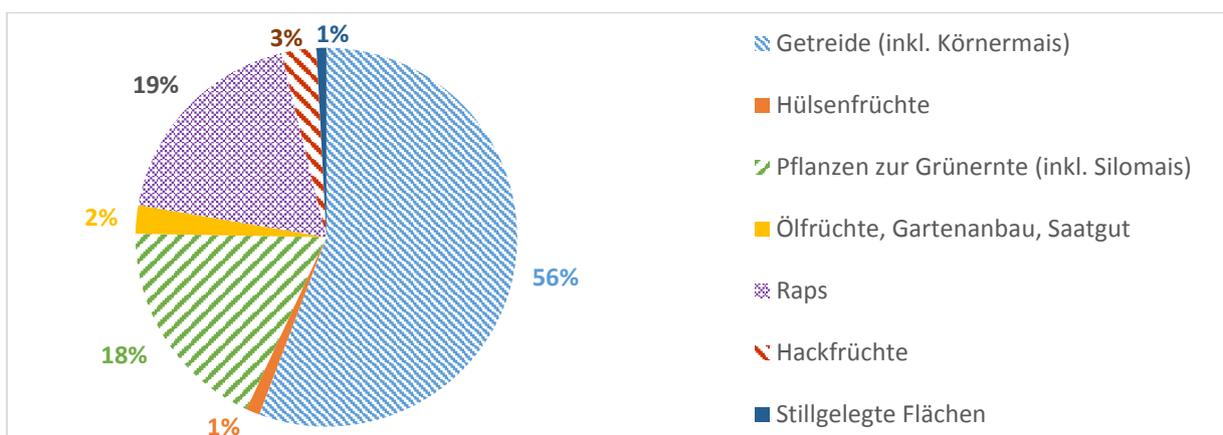


Abbildung 6.5: Mengenverteilung von Anbaukulturen in Sachsen (Statistisches Landesamt Sachsen 2012b)

Der Methanertrag bei der Biogaserzeugung variiert in Abhängigkeit des Gehaltes an Lignin und Cellulose bei den einzelnen Substraten. In diesem Beitrag werden die auf Ackerflächen angebaute drei

Hauptsubstrate Getreide, Raps sowie Ganzpflanzen zur Grünernte betrachtet. Für die Ermittlung des technischen Potenzials an Biogas aus Anbaukulturen können nur Flächen bzw. Anbauerträge zur Biogasproduktion herangezogen werden, die nicht für die Nahrungs- und Futtermittelerzeugung genutzt werden.

Die Erntemenge [t]

$$M_{Fruchtart} = m_{Fruchtart} \cdot A_{Fruchtart} \quad 6.9$$

berechnet sich aus dem mittleren Ernteertrag $m_{Fruchtart}$ [t/ha] der betrachteten Fruchtarten aus dem Jahre 2012 und deren Anbaufläche $A_{Fruchtart}$ [ha] nach der Regionalstatistik des Freistaates Sachsen (2013a). Die Fruchtart Raps wird in Abschnitt 6.2 betrachtet, da die für die energetische Nutzung angebauten Rapskulturen vorwiegend zur Biokraftstoffproduktion eingesetzt werden. Analog wird in diesem Abschnitt das Potenzial an Getreide zur Biokraftstoffproduktion abgeschätzt.

Der Ernteertrag für Getreide betrug im Jahre 2012 2,6 Millionen t (Statistisches Landesamt Sachsen 2012b). Getreide wird hauptsächlich für den Nahrungs- und auch für den Futtermittelbetrieb angebaut. Anbauerträge über den Bedarf im Freistaat Sachsen hinaus können exportiert oder energetisch genutzt werden. In dieser Arbeit wird Sachsen als Selbstversorger betrachtet. Ein- und Ausfuhrmengen an Getreide bleiben unberücksichtigt. Das technische Potenzial berechnet sich aus dem Überschuss an Getreideproduktion über den Eigenbedarf hinaus.

Diese Überschussmenge an Getreide variiert mit dem Nahrungsmittel- und Futtermittelverbrauch. Ausgehend von einem Pro-Kopf-Verbrauch an Getreide von 96,5 kg/a wird der Getreidebedarf zur Nahrungsmittelproduktion berechnet (BMELV Statistische Jahrbuch 2012). Der Bedarf an Getreide zur Futtermittelproduktion wird über den Viehbestand ermittelt.

Der Ernteertrag für Pflanzen zur Grünernte betrug im Jahre 2012 4,3 Millionen t. Pflanzen zur Grünernte sind Kulturen, die in grünem Zustand als Ganzpflanze geerntet werden. Hierzu zählen Getreide als Ganzpflanze, Grün- und Silomais, Grasanbau auf Ackerfläche und Hülsenfrüchte (Leguminosen) zur Ganzpflanzenernte. Pflanzen zur Grünernte können sowohl als Futtermittel eingesetzt werden, als auch zu Biogas weiterverarbeitet werden. Analog zur Biogasproduktion aus Getreideüberschüssen gilt bei der Berechnung des Volumens an Biogas aus Pflanzen zur Grünernte die Annahme des Selbstversorgers. Der Bedarf an Pflanzen zur Grünernte zur Futtermittelproduktion wird aus der Studie Schätzung der Futteraufnahme bei der Milchkuh von Gruber (2006) abgeleitet. Es wird ein Jahresverbrauch von 4000 kg Grobfutter pro Großvieheinheit angenommen. Der Ernteertrag an Grünpflanzen der über den Futtermittelbedarf hinausgeht, wird als Überschussmenge betrachtet und geht in das technische Potenzial zur Biogasproduktion aus Pflanzen zur Grünernte ein.

In Tab. 6.4 sind die Werte, für die Berechnung des Nahrungs- und Futtermittelverbrauch von Getreide und Pflanzen zur Grünernte, dargestellt.

Tabelle 6.4: Überschussmengen an Getreiden und Pflanzen zur Grünernte auf Landes-Ebene

		Getreide	Pflanzen zur Grünernte
Gesamte Erntemenge [t]		2.550.656	4.262.756
Nahrungs- mittel	Pro Kopf Verbrauch ⁹ [kg/a]	96,5	--
	Einwohner in Sachsen ¹⁰	4.050.204	--
	Getreidebedarf [t]	390.845	--
Futter- mittel	Spez. Verbrauch ¹¹ [t/GV]	2	4
	Viehbestand ¹² [GV]		677.977
	Getreide und Grünerntebedarf [t]	1.355.954	2.711.908
Bedarf für Futter- und Nahrungsmittel [t]		1.746.799	2.711.908
Überschuss an Getreide und Grünernte [t]		803.857 (31,5%)	1.550.848 (36%)

Das technische Potenzial [kWh] der hier betrachteten Fruchtarten zur Biogasproduktion

$$E_{Fruchtart}^{tech} = M_{Fruchtart}^{Überschuss} \cdot v_{Fruchtart} \cdot H_{CH_4} \quad 6.10$$

berechnet sich aus dem Überschuss an Getreide bzw. der Grünernte $M_{Fruchtart}^{Überschuss}$ [t], dem spezifischen Methanertrag der Fruchtart $v_{Fruchtart}$ [m³/t] und dem Heizwert H_{CH_4} von Methan (9,97 kWh/m³).

Tabelle 6.5 stellt die Erntemenge der Fruchtarten Getreide und Pflanzen zur Grünernte dar, sowie das energetische Potenzial.

Tabelle 6.5: Theoretisches und technisches Potenzial an Biogas aus Getreide- und Grünernte auf Landes-Ebene

Ackerfläche 719.000 ha	Getreide ¹³		Pflanzen zur Grünernte ¹⁴	
	Theoretisches Potenzial	Technisches Potenzial (31,5%)	Theoretisches Potenzial	Technisches Potenzial (36%)
Ernteertrag [t]	2.500.000	803.816	4.300.000	1.500.000
Energiegehalt [TWh]	8,19	2,58	4,31	1,51

Das technische Potenzial von Getreide zur Biogasproduktion auf Grundlage der Ernteerträge aus dem Jahre 2012 beträgt 2,58 TWh und bei den Pflanzen zur Grünernte 1,51 TWh.

Die technischen Potenziale sind stark regional abhängig. Der Bedarf an Futtermittel resultiert aus dem Viehbesatz je Region. Der Nahrungsmittelbedarf basiert in dieser Analyse auf der Einwohnerzahl der einzelnen Landkreise. In den kreisfreien Städten Dresden, Leipzig, Chemnitz sowie dem Erzgebirgskreis übersteigt der Konsum an Getreideprodukten aus Nahrungsmitteln das Angebot an Getreide aus Ernteerträgen. Somit liegt ein negativer Überschuss vor. Gleiches gilt für den Bedarf an

⁹ BMELV Statistisches Jahrbuch (2012)

¹⁰ Statistik Sachsen (2012)

¹¹ BMELV Statistisches Jahrbuch (2012), DLG Gruber (2006)

¹² Viehwirtschaft in Sachsen (2012)

^{13/14} Es wurde ein spezifischer Methanertrag von 322 m³/t bei Getreide sowie 88,5 m³/t bei Pflanzen zur Grünernte angenommen (BiomasseV 2001).

Pflanzen zur Grünernte für die Futtermittelproduktion in den kreisfreien Städten Dresden und Leipzig sowie den Landkreis Nordsachsen. Die folgenden Abb. 6.6 stellt das Potenzial an Biogas aus Getreide und Pflanzen zur Grünernte auf Landkreis-Ebene dar.

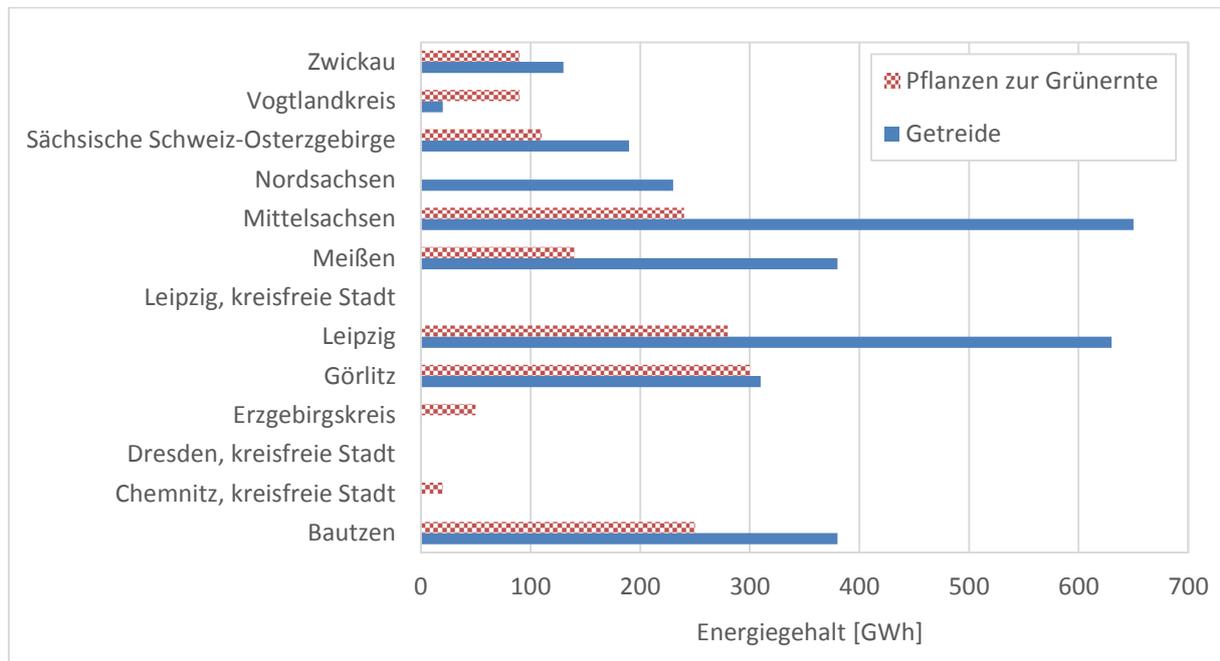


Abbildung 6.6: Technisches Potenzial an Biogas aus Getreide und Pflanzen zur Grünernte auf Landkreis-Ebene

Aufgrund der beim Anbau von Getreide und Pflanzen zur Grünernten einzuhaltenden Fruchtfolge sowie saisonbedingter Schwankungen bei den Ernteerträgen kann das Potenzial nur bedingt auf zukünftige Jahre übertragen werden. Das hier berechnete Potenzial bezieht sich auf die im Jahr 2012 geernteten Anbaukulturen.

Mögliche Flächen die zur Energiegewinnung herangezogen werden können sind Stilllegungsflächen. In Sachsen betragen die stillgelegten Flächen in den Jahren 1999 bis 2012 insgesamt 120.000 ha (Statistisches Landesamt Sachsen 2012b). Zu den Brach- und Stilllegungsflächen zählen alle Ackerflächen, auf denen vorübergehend keine landwirtschaftlichen Produkte für die Nahrungs- und Futtermittelindustrie erzeugt werden. Gemäß der Reform zur gemeinsamen europäischen Agrarpolitik ist es möglich, auf stillgelegten Flächen nachwachsende Rohstoffe anzubauen. Es müssen aber Bedingungen eingehalten werden, sonst erlöscht die Anerkennung als Stilllegungsfläche und somit der Verlust des Anspruches auf Stilllegungsausgleich (BMEL 2005). Erträge von Stilllegungsflächen werden in der Arbeit nicht betrachtet.

6.2 Theoretisches und technisches Potenzial an Biokraftstoffen im Freistaat Sachsen

6.2.1 Produktion von Biodiesel aus Rapskulturen

Der Kraftstoff Biodiesel kann durch Umesterung von pflanzlichen Ölen gewonnen werden. Als einheimische Kulturpflanze bietet sich Raps als Basis für die dafür erforderliche Produktion von pflanzlichen Ölen an. Die Anbaufläche von Rapskulturen in Sachsen betrug im Jahre 2012 etwa 133.000 ha (Statistisches Landesamt Sachsen 2012b). Der durchschnittliche landwirtschaftliche Hektarertrag von Raps betrug im Jahre 2012 3,8 t/ha. Es wurden in Summe etwa 512.000 t Raps gewonnen.

Der massenbezogene Ölgehalt von Rapssamen beträgt 40% (FNR 2012a). Bei der Veredelung von Rapsöl zu Biodiesel bleibt die Gesamtmasse nahezu konstant (FNR 2013b). Somit kann das Potenzial an Biodiesel aus Rapskulturen

$$E_{Biodiesel}^{tech} = M_{Biodiesel}^{tech} \cdot H_{Biodiesel} \quad 6.11$$

direkt über die aus der Erntemenge produzierbare Masse an Rapsöl $M_{Biodiesel}^{tech}$ abgeleitet werden. Es wird mit einem Heizwert $H_{Biodiesel}$ von Biodiesel in Höhe von 37,1 MJ/kg gerechnet und eine Dichte von 0,88 kg/l für Biodiesel angenommen (FNR 2012a).

Raps wird mit einem Anteil von 58% in Deutschland primär zur Produktion von Biokraftstoffen angebaut (BMBF 2011). Etwa 30% fließen in die Nahrungsmittelproduktion sowie 12% in die Produktion von Schmierstoffen ein. Aufgrund der diversen Nutzungsmöglichkeiten im Nahrungsmittelsektor kann nur schwer der Eigenbedarf in Sachsen im Sinne der Selbstversorger Annahme aus Abschn. 6.1.4 abgeschätzt werden. Zudem ist aufgrund des hohen Anteils zur Produktion von Biokraftstoffen davon auszugehen, dass nur geringfügig Überschüsse vorhanden sind. Unter diesen getroffenen Annahmen entspricht das Potenzial an Raps zur Produktion von Biokraftstoffen direkt der in Sachsen im Jahre 2012 produzierten Menge.

Tabelle 6.6: Theoretisches und technisches Potenzial an Biodiesel aus Rapskulturen auf Landes-Ebene

<i>Rapsanbaufläche</i> 132.978 ha	<i>Theoretisches Potenzial</i>	<i>Technisches Potenzial (58%)</i>
<i>Rapsertag [t]</i>	511.965	296.940
<i>Ölertrag (40%) [t]</i>	204.786	118.776
<i>Kraftstoffertag [l]</i>	232.711.364	134.972.670
<i>Energiegehalt [TWh]</i>	2,11	1,22

Das technische Potenzial an Biodiesel aus Rapskulturen auf Grundlage der Erträge aus dem Jahre 2012 beträgt etwa 135 Millionen Liter (118.000 t) Biodiesel. Dies entspricht einem Energiegehalt von 1,22 TWh. Die vier in Sachsen installierten Produktionsanlagen von Biodiesel verfügen über eine Kapazität von 106.000 t pro Jahr. Der Bedarf an Rapsöl, kann somit in Summe vollständig durch den heimischen Anbau gedeckt werden (AEE 2013).

6.2.2 Produktion von Bioethanol aus Getreidekulturen

Für die Produktion von Bioethanol werden in Deutschland vorwiegend Getreide (ca. 2/3) und Zuckerrüben (ca. 1/3) fermentiert (VDB 2012). Die folgenden Berechnungen beschränken sich auf die in Abschn. 6.1.4 ermittelten Überschusskapazitäten an Erntemengen aus Getreide.

Das Volumen an Kraftstoff aus überschüssigen Ernteerträgen wird über einen massenspezifischen Einsatzfaktor in Höhe von 2,5 kg/l berechnet, der den Getreideeinsatz je Liter Bioethanol abbildet (FNR 2013b).

Das technische Potenzial an Bioethanol aus Getreidekulturen

$$E_{Bioethanol}^{tech} = M_{Bioethanol}^{tech} \cdot H_{Bioethanol} \quad 6.12$$

wird über das aus überschüssigen Getreideerträgen berechnete Volumen an Bioethanol $M_{Bioethanol}^{tech}$ [l] und dem Heizwert $H_{Bioethanol}$ in Höhe von 21,06 MJ/l ermittelt.

Die folgende Tab. 6.7 stellt die resultierende Menge an Bioethanol für Sachsen auf Grundlage der Erträge im Jahre 2012 dar.

Tabelle 6.7: Theoretisches und technisches Potenzial an Bioethanol aus Getreidekulturen auf Landes-Ebene

<i>Getreideanbaufläche 400.966 ha</i>	<i>Theoretisches Potenzial</i>	<i>Technisches Potenzial (31,5%)</i>
<i>Getreideertrag [t]</i>	2.500.000	803.816
<i>Kraftstoff'ertrag [l]</i>	1.000.000.000	321.526.570
<i>Energiegehalt [TWh]</i>	5,85	1,88

Das ermittelte technische Potenzial an Bioethanol aus Getreidekulturen ohne Berücksichtigung der konkurrierenden Nutzungsmöglichkeiten beträgt etwa 1,88 TWh. Die zwei in Sachsen installierten Produktionsanlagen von Bioethanol verfügen zum Vergleich über eine Kapazität von ca. 152,54 GWh (20.600 t) pro Jahr (AEE 2013).

6.2.3 Produktion von synthetischen Kraftstoffen aus Getreide- und Rapsstroh

In verschiedenen Forschungseinrichtungen werden gegenwärtig unterschiedliche Verfahren zur Herstellung von BtL-Kraftstoffen entwickelt. Besonders geeignet ist zellulosereiche, trockene Restbiomasse (Stroh, Restholz, Energiepflanzen). In einem von Kerdoncuff (2008) vorgestellten Produktionsverfahren zur industriellen Anwendung fließen in die Herstellung von einem Liter BtL-Kraftstoff etwa 6,6 kg Stroh ein.

Im Folgenden werden für die Berechnungen des Potenzials an synthetischen Kraftstoffen die in Abschnitt 6.1.3 ermittelten überschüssigen Mengen an Getreide- und Rapsstroh herangezogen. Das technische Potenzial an BtL-Kraftstoff aus Getreide- und Rapsstroh

$$E_{BtL}^{tech} = M_{BtL}^{tech} \cdot H_{BtL} \quad 6.13$$

berechnet sich über den oben genannten Stroheinsatz aus dem überschüssigen Strohangebot berechnete Volumen an BtL-Kraftstoff M_{BtL}^{tech} [l] sowie dem Heizwert H_{BtL} von BtL-Kraftstoff in Höhe von 33,45 MJ/l.

In der folgenden Tab. 6.8 wird das berechnete technische Potenzial an BtL-Kraftstoff aufgezeigt. Zum Vergleich werden die technischen Potenziale von Stroh zur Festbrennstoff- und zur Biogasnutzung aus Abschn. 6.1.3 auch aufgezeigt.

Tabelle 6.8: Theoretisches und techn. Potenzial an BtL-Kraftstoff aus Getreide- und Rapsstroh auf Landes-Ebene

<i>Getreide- und Raps- anbaufläche 4.186.130 ha</i>	<i>Theoretisches Potenzial</i>			<i>Technisches Potenzial (33%)</i>		
	<i>Festbrennstoff</i>	<i>Biogas</i>	<i>Kraftstoff</i>	<i>Festbrennstoff</i>	<i>Biogas</i>	<i>Kraftstoff</i>
<i>Strohertrag [t]</i>		3.056.471			1.008.635	
<i>Kraftstoffenertrag [l]</i>	--	--	463.101.668	--	--	152.823.551
<i>Energiegehalt [TWh]</i>	12,41	4,91	4,30	4,01	1,62	1,42

Bei einem Überschuss an Erträgen aus Getreide- und Rapsstroh in Höhe von etwa 1 Mio Tonnen beträgt das technische Potenzial an BtL-Kraftstoff 1,42 TWh.

6.3 Ergebnisse: Technisches Potenzial an Biogas und Biokraftstoffen im Freistaat Sachsen (Zusammenfassende Darstellung)

Bei den für den Anbau von Biomasse zur energetischen Nutzung vorhandenen Flächen bestehen Nutzungskonkurrenzen. Einerseits können unterschiedliche Fruchtarten zur energetischen Nutzung angebaut werden, andererseits kann je Fruchtart zwischen unterschiedlichen Nutzungspfaden wie etwa der Weiterverwendung in Form eines gasförmigen (Biogas) oder aber auch flüssigen Energieträgers (Biokraftstoff) unterschieden werden. Aus diesem Grunde wurden in dieser Studie die technischen Potenziale je Nutzungspfad und ausschließlich aus vorhandenen Überschussmengen ermittelt, so dass etwaige Konkurrenzen unberücksichtigt bleiben. Die folgende Abb. 6.7 stellt zusammenfassend die grundlegenden Annahmen bezüglich der Berechnung der Überschussmengen dar.

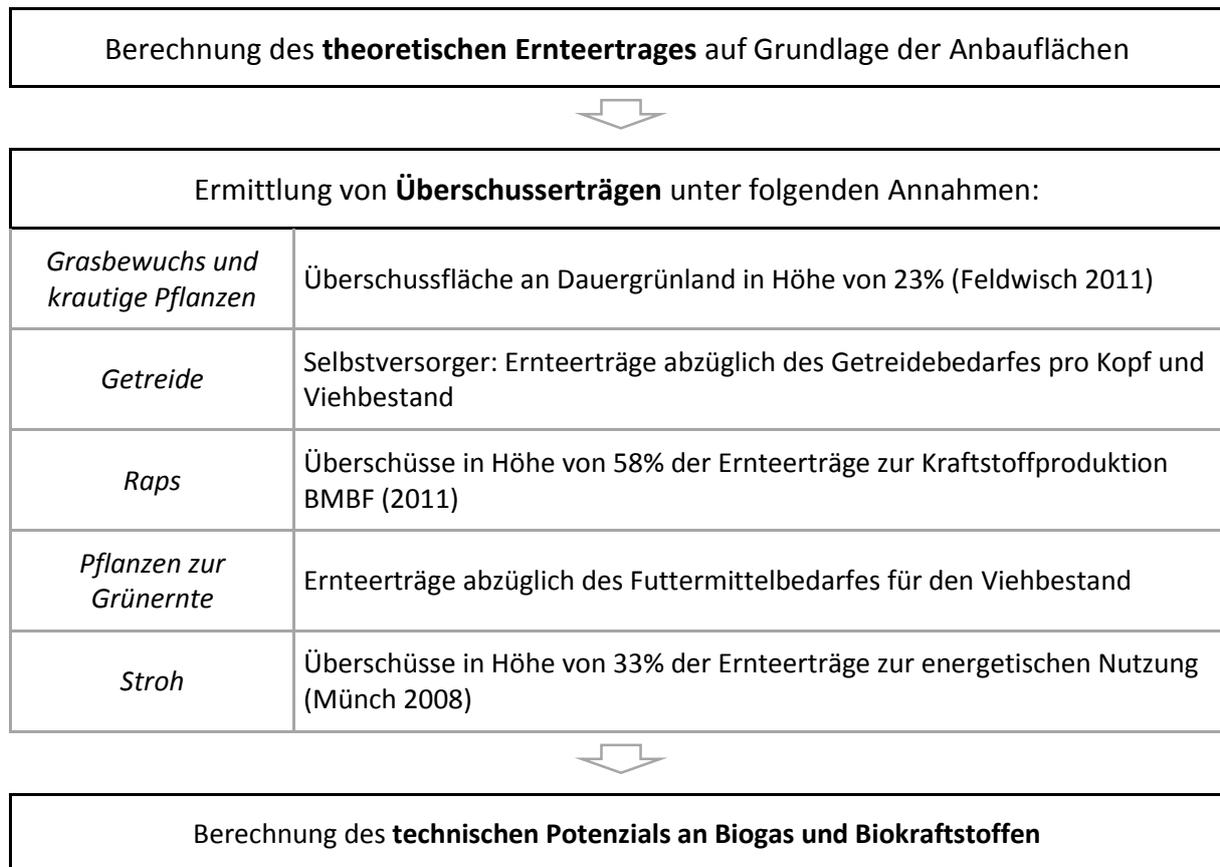


Abbildung 6.7: Technisches Potenzial an Biogas und Biokraftstoffen in Sachsen (Berechnungssystematik)

Das auf Grundlage dieser Annahmen berechnete technische Potenzial an Biogas und Biokraftstoffen im Freistaat Sachsen wird in der folgenden Tab. 6.9 zusammenfassend aufgezeigt.

Tabelle 6.9: Technisches Potenzial an Biogas und Biokraftstoffen in Sachsen

	<i>Primärenergieträger</i>	<i>Mittlerer spez. Ertrag</i>	<i>Überschussertrag [t] (Anteilig)</i>	<i>Endenergieträger</i>	<i>Spez. Methanertrag / Spez. Kraftstofftrag</i>	<i>Methanertrag / Kraftstofftrag</i>	<i>Technisches Potenzial [TWh]</i>	
<i>Energiepflanzen</i>	<i>Dauergrünland</i> 184.222 ha	8 t/ha	338.968 (23%)	Biogas [m ³]	100 [m ³ /t]	34 · 10 ⁶ [m ³]	0,34	
	<i>Ackerland 719.000 ha</i>	Getreide (Körnermais) 400.966 ha	6,5 t/ha (9,6 t/ha)	803.816 (31,5%)	Biogas [m ³]	259 · 10 ⁶ [m ³]	2,58	
					Bioethanol [l]	0,4 [l/kg]	322 · 10 ⁶ [l]	1,88
		Raps 132.978 ha	3,8 t/ha	296.940 (58%)	Biodiesel [l]	0,4 [l/kg]	135 · 10 ⁶ [l]	1,22
	Pflanzen zur Grünernte (Silomais) 131.301 ha	8,5 t/ha (42 t/ha)	1,5 · 10 ⁶ (36%)	Biogas [m ³]	88 (106) [m ³ /t]	153 · 10 ⁶ [m ³]	1,51	
<i>Abfälle / Reststoffe</i>	Getreidestroh	5,9 t/ha	1 · 10 ⁶ (33%)	Biogas [m ³]	161 [m ³ /t]	162 · 10 ⁶ [m ³]	1,62	
				BtL-Kraftstoff [l]	0,15 [l/kg]	153 · 10 ⁶ [l]	1,42	
	<i>Tierische Exkremente</i>	Rinder (396.899 GV)	18 l/GV	7,1 · 10 ⁶ (100%)	Biogas [m ³]	17 [m ³ /t]	121 · 10 ⁶ [m ³]	1,21
		Schweine (145.620 GV)	15 l/GV	2,2 · 10 ⁶ (100%)	Biogas [m ³]	12 [m ³ /t]	26 · 10 ⁶ [m ³]	0,26

Das technische Potenzial an Biogas aus Energiepflanzen, landwirtschaftlichen Abfällen und tierischen Reststoffen im Freistaat Sachsen beträgt 7,52 TWh. Insgesamt umfasst das technische Potenzial an Biokraftstoffen 4,52 TWh.

Abbildung 6.8 zeigt das technische Potenzial an Biogas in den einzelnen Landkreisen des Freistaates. Die Landkreise Mittelsachsen, Leipzig, Görlitz sowie Bautzen verfügen im Vergleich über große technische Potenziale, die durch den hohen Anteil an Ackerflächen in diesen Landkreisen zu erklären sind. Auch die Verteilung der einzelnen Fruchtarten variiert in den einzelnen Landkreisen. Potenziale zur Biogasproduktion aus Kulturen von Dauergrünland weisen überwiegend die Landkreise Erzgebirgskreis, Görlitz und Sächsische Schweiz–Osterzgebirge auf. Insgesamt kann festgehalten werden, dass das technische Potenzial sich überwiegend aus Überschusserträgen von Getreidekulturen sowie Pflanzen zur Grünernernte berechnet.

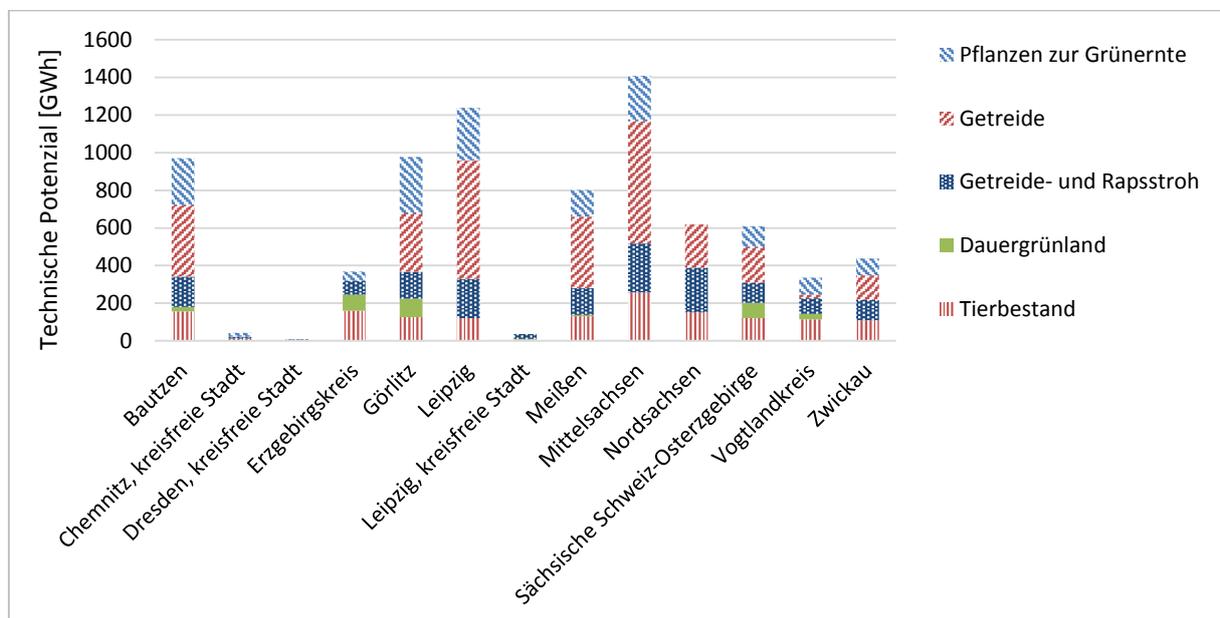


Abbildung 6.8: Technisches Potenzial an Biogas im Freistaat Sachsen

Im Jahr 2013 betrug im Freistaat Sachsen die installierte Leistung an BHKW's zur Verstromung von Biogas 110 MW, verteilt auf 255 Anlagen (Saena 2013). Mit einer durchschnittlichen Anlagenauslastung von 7.800 Vollaststunden (Brückner 2012) wird eine elektrische Energie von ca. 858 GWh bereitgestellt. Bei einem durchschnittlichen elektrischen Wirkungsgrad von 35% wird bislang in etwa nur ein Drittel des zur Verfügung stehenden technischen Potenzials an Biogas aus Biomasse in elektrische Energie gewandelt.

6.4 Gestehungskosten von elektrischem Strom aus BHKW's mit Biogasverbrennung

6.4.1 Typische Anlagenkonfigurationen in Sachsen

In dieser Arbeit werden Stromgestehungskosten typischer Biogasanlagen im Freistaat Sachsen ermittelt. Prinzipiell unterscheiden sich Biogasanlagen in der installierten Leistung sowie in den eingesetzten Substraten zur Biogasproduktion. Die Zusammensetzung des eingesetzten Substrates bedingt die verwendete Vergärungstechnologie, Nass- oder Trockenfermentation. Zudem beeinflusst das Substrat, bedingt durch die chemische Zusammensetzung, den Methangehalt des Biogases und somit die Produktivität der Biogasanlage.

Die Anlagengrößen in Sachsen reichen von landwirtschaftlichen Einzelanlagen ab ca. 30 kW bis hin zu größeren Gemeinschaftsanlagen mit einer Leistung von mehreren Megawatt. Die mittlere elektrische Leistung bei Neuanlagen in Sachsen liegt zwischen 300 und 400 kW. Vorwiegend werden in diesen Anlagen Substrate mit großen Anteilen an Tierexkrementen verwendet. Als Kosubstrate werden überwiegend Getreide, Mais- und Grassilage herangezogen (FNR 2010).

In Sachsen waren im Jahr 2012 insgesamt 255 Biogasanlagen im landwirtschaftlichen Bereich und in der verarbeitenden Nahrungsmittelproduktion mit einer elektrischen Gesamtleistung von 110 MW installiert (Saena, 2013). Die folgende Abb. 6.9 zeigt die Anlagenanzahl und installierte elektrische Leistung in Abhängigkeit typischer Leistungsklassen auf.

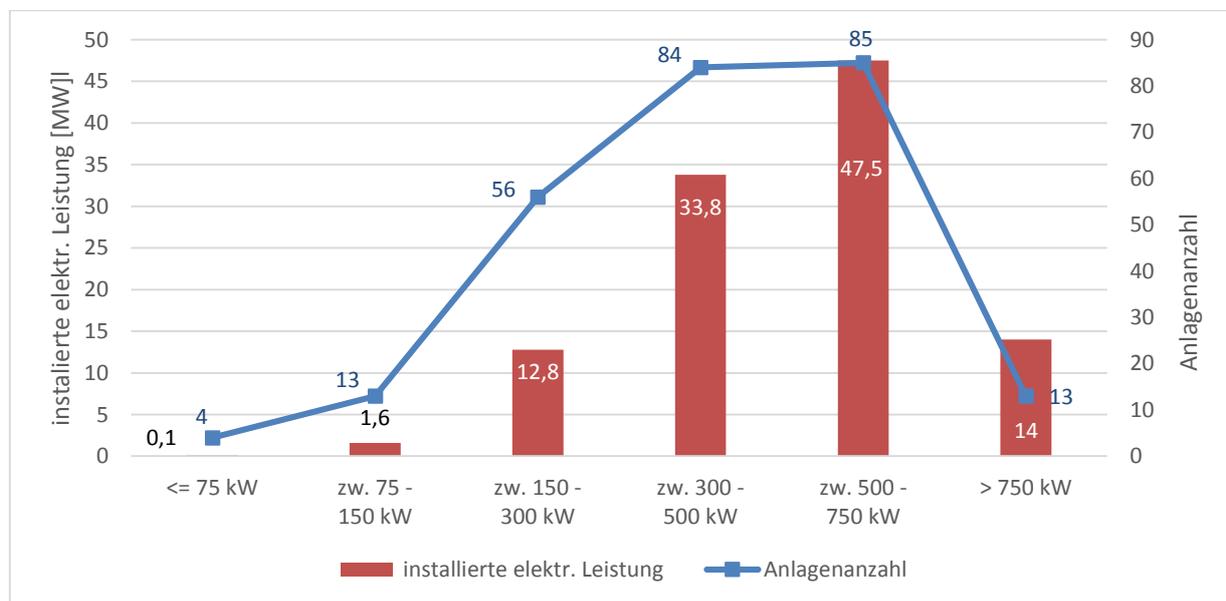


Abbildung 6.9: Installierte elektrische Leistung von BHKW's in Sachsen nach Leistungsklassen (SAENA 2013)

6.4.2 Spezifische Investitionen für typische Anlagengrößen

Die Investitionen beinhalten Ausgaben für die baulichen und technischen Anlagenteile der Biogasanlage und des BHKW's, die Elektro- und Leittechnik mit Stromnetzeinbindung sowie die Planungs- und Genehmigungsleistungen. Die Kosten hängen u.a. vom eingesetzten Motoren-Typ (Zündstrahl- oder Gas-Otto-Motor) und bautechnischer Gegebenheiten ab (IWR 2013).

Die folgende Tab. 6.10 stellt spezifische Investitionen für die genannten Komponenten in Abhängigkeit typischer Leistungsklassen dar (FNR 2011, FNR 2013, Brückner 2008, Schwarz 2012, Moser 2008).

Tabelle 6.10: Technisches Potenzial an Biogas und Biokraftstoffen in Sachsen

<i>Elektr. Nennleistung</i>	<i>Spezifische Investitionen</i>
75 kW	7.000 EUR/kW
150 kW	4.600 EUR/kW
350 kW	3.800 EUR/kW
500 kW	3.200 EUR/kW
1000 kW	2.700 EUR/kW

6.4.3 Jährliche Gesamtausgaben für den Substrateinsatz

Die jährlichen Gesamtausgaben setzen sich aus festen und variablen Bestandteilen für den Betrieb, Wartung, Reparatur und Versicherungen sowie den Ausgaben für den Substrateinsatz zusammen.

Die Substratauswahl für die Biogasanlage stellt eine wichtige Regelgröße für die Wirtschaftlichkeit der Anlage dar. Bei marktgängigen Fruchtarten kann zur Bewertung der Ausgaben für Substrate der Marktpreise herangezogen werden. Für diese Fruchtarten wird im Folgenden aufgrund von stark schwankenden Preisen ein Mittel aus mehreren Jahren gebildet. Ausgaben für die Aufbereitung und Lagerung müssen gesondert veranschlagt werden. Sind die Feldfrüchte nicht marktgängig, können Ausgaben für die Herstellung betriebsspezifisch berechnet werden (Jäkel 2003).

In Sachsen werden die vorhandenen Biogasanlagen überwiegend in Verbindung mit Rinder- und Schweinemastbetrieben geführt (FNR 2010). Das Hauptsubstrat ist somit der Wirtschaftsdünger Gülle und als Kosubstrate werden Mais- und Grassilagen, sowie Energiepflanzen und Getreide verarbeitet. Derzeit sind zunehmend auch Anlagen mit Maissilage als Hauptsubstrat zu beobachten (DBFZ 2010).

In Regionen mit einer intensiven Viehwirtschaft besteht ein Überangebot an Gülle. In Regionen mit einem geringen Viehbestand wird Gülle als begehrter Wirtschaftsdünger gehandelt. Auf Grundlage der Viehdichte in Sachsen wird davon ausgegangen, dass Gülle als Überschuss zur Verfügung steht und somit kostenfrei, bzw. aus eigener Bewirtschaftung zur energetischen Nutzung weiterverarbeitet werden kann.

Ausgaben für die Substrate Getreide, Mais, Heu und Stroh werden von den Großhandelspreisen abgeleitet. Diese unterliegen verschiedenen Schwankungen, teilweise auch bedingt durch eine von ausländischen Ernteergebnissen abhängige Exportnachfrage. Für die Berechnung der Ausgaben für die am Markt gehandelten Substrate Weizen, Mais, Heu und Stroh werden die in Abb. 6.10 dargestellten Preise aus dem Zeitraum Juni 2011 bis September 2013 herangezogen. Abgebildet sind die

Großhandelspreise für Weizen und Mais¹⁵ an der Mitteldeutschen Produktbörse Dresden sowie für Heu und Stroh die Großhandelspreise des Landesbetriebes Landwirtschaft Hessen.

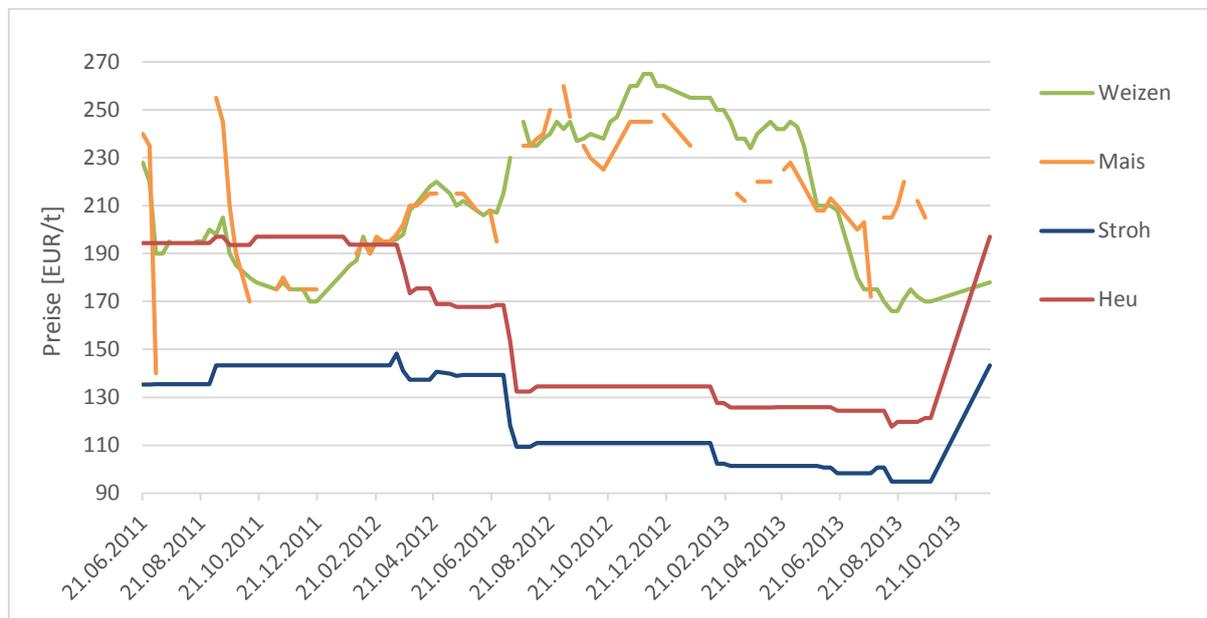


Abbildung 6.10: Großhandelspreise für Weizen, Mais, Stroh und Heu im Zeitraum Juni 2011 bis September 2013

Der Preis für Silomais bzw. Maissilage wird in Anlehnung an Kuhlmann (2009) von dem Großhandelspreis von Weizen abgeleitet. Es wird angenommen, dass sich ein Indifferenzpreis von Silomais einstellt, mit dem gleiche Deckungsbeiträge wie bei dem Einsatz von Weizen als Substrat erzielbar sind. Weiterhin wird angenommen, dass der Silomais zum Erntezeitpunkt verkauft wird und somit die Lagerkosten und Lagerverluste beim Abnehmer liegen. Kosten für die Ernte, den Transport zum Silo und das Verdichten sind in die Berechnung des Indifferenzpreises eingegangen und werden vom Substratlieferant getragen. Darüber hinaus beinhaltet die Substratanlieferung eine kostenlose Gärrestrücknahme.

Die Kosten für den Substrateinsatz von Grassilage in Biogasanlagen kann mit den Bereitstellungskosten für Maissilage verglichen werden. Die Substratkosten werden wesentlich durch die Ernte bestimmt. Abhängig von regionalen Bedingungen liegen die Erzeugungskosten für Grassilage zwischen 27 EUR/t und 48 EUR/t (Elsäßer 2012).

In der folgenden Tab. 6.11 werden die mittleren Großhandelspreise für die Substrate Getreide, Mais, Heu und Stroh sowie der ermittelte Indifferenzpreis für das Substrat Silomais in den Jahren 2011, 2012 und 2013 dargestellt.

¹⁵ Für das Substrat ist der Preis an der Produktbörse im oben genannten Zeitraum nicht durchgängig verfügbar.

Tabelle 6.11: Mittlere Großhandelspreise für Weizen, Mais, Stroh und Heu im Zeitraum Juni 2011 bis September 2013

<i>Mittlerer Preis [EUR/t]</i>	<i>ab Juni 2011¹⁶</i>	<i>2012</i>	<i>bis September 2013</i>
<i>Weizen</i>	188,41	223,91	214,24
<i>Silomais</i>	32,48	38,11	36,70
<i>Mais</i>	200,82	221,45	212,82
<i>Heu</i>	183,15	163,24	126,85
<i>Stroh</i>	127,98	132,24	102,28

Neben den Ausgaben für den Einkauf der Substrate, fallen auch Ausgaben für den Transport, eine benötigte Substratvorbehandlung sowie eine Gärrestentsorgung an. Bei Anlagen mit Gülle als Substrat wird in dieser Arbeit angenommen, dass der Güllebezug direkt über die Bewirtschaftung des an die Biogasanlage angeschlossenen Viehbetriebes erfolgt und keine Transportkosten entstehen. Bei den Anlagen mit Silomais als Substrat werden Transportkosten nach Kuhlmann (2009) berücksichtigt. Eine Substratvorbehandlung kann eine Steigerung des Biogasertrages bewirken. Die Zerkleinerung von lüftungsintensiven Substraten hat auch einen technologischen Vorteil (Vermeidung von Schwimmschichten, Verringerung des Rühraufwandes) (Weiß 2008). Durch die Gärrestaufbereitung können die auszubringenden Mengen reduziert werden, um Lagerungs- und Ausbringungskosten zu vermindern und/oder Umweltbelastungen zu reduzieren (Raussen 2008). Den Ausgaben für die Substrataufbereitung steht ein höherer Biogasertrag entgegen. Zudem sind sie abhängig von der Anlagenkonfiguration sehr differenziert ausgeprägt. Aus diesen Gründen werden sie in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Ob und in welcher Höhe der Gärrest wirtschaftlich weiter verwertet werden kann, ist abhängig von den regionalen Gegebenheiten und wird in der Literatur kontrovers diskutiert. In Anlehnung an Kuhlmann (2009) wird von einer kostenlosen Gärrestrücknahme bei Substraten aus Silomais ausgegangen. Ferner wird angenommen, dass Gärreste bei Substratmischungen die vorwiegend aus Gülle bestehen wertneutral auf dem an der Biogasanlage angeschlossenen Hof weiter verarbeitet werden.

Der Bedarf an Substraten zur Elektrizitätserzeugung wird in Abhängigkeit der Leistungsklasse über die jährliche Erzeugung bei Volllaststunden in Höhe von 7.800 ermittelt, welche der durchschnittlichen Auslastung der in Sachsen im Jahre 2010 installierten Anlagen entsprechen (Brückner 2012). Dabei wird ein klassenspezifischer elektrischer Wirkungsgrad zwischen 36% und 43% angenommen (ASUE 2011).

6.4.4 Jährliche Ausgaben für sonstige betriebs- und investitionsabhängige Kosten

Die in dieser Arbeit berücksichtigten sonstigen betriebs- und investitionsabhängigen Ausgaben setzen sich aus fixen Bestandteilen für Wartung, Reparatur und Personal sowie variablen Bestandteilen für Prozessenergie, Betriebsmittel und Verwaltung zusammen. Alle Ausgaben fließen klassenspezifisch nach den in Tab. 6.10 genannten Anlagenkonfigurationen sowie gestaffelt unter Berücksichtigung von Skalierungseffekten in die Berechnungen ein. In der folgenden Tab. 6.12 sind alle Annahmen bezüglich der sonstigen betriebs- und investitionsabhängigen Ausgaben zusammenfassend dargestellt.

Fixe Ausgaben für den Betrieb der Biogasanlage sowie Versicherung werden durch eine spezifische Kennzahl bezogen auf die Anfangsinvestition in das BHKW berechnet.

¹⁶ Daten erst ab Juni 2011 abrufbar (www.proplanta.de).

Tabelle 6.12: Sonstige betriebs- und investitionsabhängige Ausgaben

<i>Fixe Ausgaben</i>				
WACC ¹⁷	[%]	4,1	Kost (2013)	
Wartung/Reparatur BGA	[EUR/a]	0,02	Wilfert (2004)	
Versicherung	[EUR/a]	0,5	FNR (2010)	
Personalkosten	[EUR/h]	15	Wilfert (2004)	
Personaleinsatz	[h/d]	2-7	Wilfert (2004)	
Betriebsmittel	[EUR/a]	1000 - 5000	Wilfert (2004)	
Betriebskosten	[EUR/a]	2000	Wilfert (2004)	
<i>Variable Ausgaben</i>				
<i>Substratkosten</i>	Weizen	[EUR/t]	209	Eig. Berechnung
	Silomais	[EUR/t]	35	Eig. Berechnung
	Mais	[EUR/t]	212	Eig. Berechnung
	Heu	[EUR/t]	158	Eig. Berechnung
	Stroh	[EUR/t]	121	Eig. Berechnung
	Gülle	[EUR/t]	0	Eig. Berechnung
	Grassilage	[EUR/t]	38	Eig. Berechnung
Prozessenergie	[ct/kWh]	15,10	BDEW (2013)	
Eigenstrombedarf	[%]	5-20	FNR (2013)	
Wartung/Reparatur BHKW	[ct/(kWh · kW)]	$26,137 \cdot P^{-0,5702}$ [0<P<109] $17,053 \cdot P^{-0,4782}$ [110<P<2000]	ASUE (2011)	

6.4.5 Stromgestehungskosten von typischen Anlagenkonfigurationen in Sachsen

Die im Folgenden berechneten Stromgestehungskosten wurden unter Anwendung von Gl. 3.1 ermittelt. Differenziert werden die in Abschn. 6.4.1 beschriebenen für Sachsen typischen Anlagenkonfigurationen mit variierenden Leistungsklassen sowie Zusammensetzungen des Substrates. Die folgende Tab. 6.13 stellt die einzelnen Stromgestehungskosten vergleichend gegenüber.

Tabelle 6.13: Stromgestehungskosten typischer Anlagenkonfigurationen von Biogasanlagen in Sachsen

<i>STGK [EUR/kWh]</i>	<i>75 kW</i>	<i>150 kW</i>	<i>350 kW</i>	<i>500 kW</i>	<i>1000 kW</i>
<i>80% Gülle / 20% Mais</i>	0,17	0,13	0,10	0,09	0,08
<i>50% Gülle / 50% Mais</i>	0,20	0,16	0,13	0,12	0,10
<i>50% Gülle / 50% Getreide</i>	0,24	0,19	0,17	0,15	0,14
<i>100% Maissilage</i>	0,25	0,20	0,18	0,16	0,15

Für kleine Biogasanlagen (75 kW) mit unterschiedlichen Substratkosten ergeben sich Stromgestehungskosten zwischen 0,17 EUR/kWh und 0,25 EUR/kWh. Es wird deutlich, dass die Zusammensetzung des eingesetzten Substrates einen großen Einfluss auf die Stromgestehungskosten

¹⁷ Es wird eine technische sowie wirtschaftliche Laufzeit von 20 Jahren angenommen (Kost 2013).

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Der Freistaat Sachsen verfügt über große Potenziale hinsichtlich der Elektrizitätserzeugung aus Windkraft, Photovoltaik, sowie Biogas aus landwirtschaftlicher Biomasse. Im Rahmen dieser Analyse wird für die Ermittlung des wirtschaftlichen Potenzials bei Windenergie und Photovoltaik jeweils die EEG-Vergütung nach dem EEG 2012 bei Inbetriebnahme der Anlagen im Jahre 2013 herangezogen. Das erschließbare Potenzial wird in dieser Arbeit explizit nicht behandelt, d.h. die hier genannten betriebswirtschaftlichen Potenziale stellen Obergrenzen für die unter heutiger Förderung maximal mögliche Nutzung von erneuerbarer Energien dar. Entsprechend kann durch weitere Restriktionen wie bspw. die begrenzte Aufnahmefähigkeit der Netze, begrenzte Herstellerkapazitäten, verfügbares Kapital (Fremdkapital von Banken bzw. Eigenkapital von Investoren), administrative und soziale Gegebenheiten (z.B. Genehmigungsdauer, Widerstand von Anwohnern gegen neue Windenergieanlagen in der Umgebung) und Nutzungsalternativen (eine bestimmte Dachfläche kann z.B. mit einer Photovoltaik- oder einer Solarwärmanlage genutzt werden) das tatsächlich erschließbare erneuerbare Potenzial deutlich geringer ausfallen.

Bei voller Ausschöpfung aller Flächen beträgt das Potenzial zur Bereitstellung von elektrischer Energie in den Basisszenarien etwa 43% (10,4 TWh) des Bruttostrombedarfes in Sachsen. Im Einzelnen können durch die Nutzung von Windenergie zwischen 4,3 und 9,9 TWh ohne Berücksichtigung von Waldflächen an Elektrizität pro Jahr bereitgestellt werden. Wird eine Turbine einer höheren Leistungsklasse unterstellt, wie dies für die zukünftigen Jahre projiziert wird, liegt das wirtschaftliche Potenzial sogar bei ca. 22,6 TWh. Das wirtschaftliche Potenzial zur Stromerzeugung durch Photovoltaik auf Dachflächen liegt bei ca. 3,5 TWh. Wird das gesamte Potenzial an Biogas in Blockheizkraftwerken verstromt, so entspricht dies einem Potenzial von 2,6 TWh. Im Gegensatz zum wirtschaftlichen Potenzial bei der Windenergie und der Photovoltaik, handelt es sich bei der Biomasse um das technische Potenzial. Neben dem Potenzial zur Stromerzeugung entspricht das technische Potenzial an Biogas von Überschussflächen nach Abzug des Bedarfes an Biomasse zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion ca. 20,5% (7,5 TWh) des Erdgasverbrauches im Freistaat. Bei selben Annahmen können in einem alternativen Nutzungspfad ca. 4,5 TWh an Biokraftstoffen hergestellt werden.¹⁸

Das Potenzial an erneuerbaren Ressourcen variiert in den einzelnen Landkreisen abhängig von dem Dargebot sowie Flächenverfügbarkeiten deutlich und ist auch für die jeweiligen Technologien unterschiedlich. Für die Biomasse tragen wesentlich die Landkreise Mittelsachsen, Leipzig, Görlitz sowie Bautzen aufgrund großer Vorkommen an Ackerflächen an dem Potenzial an Biogas und Biokraftstoffen bei. Bei der Photovoltaik ist das wirtschaftliche Potenzial zur Elektrizitätserzeugung maßgeblich durch die vorhandenen Dachflächen und den daraus resultierenden unterschiedlichen Jahresenergieerträgen in den einzelnen Landkreisen bestimmt. In städtischen Regionen ist mit deutlich höheren Jahresenergieerträgen aufgrund der höheren Dichte an Dachflächen zu rechnen, als in ländlichen Regionen. Über große Potenziale an Windenergie verfügen insbesondere die Landkreise Erzgebirgskreis, Görlitz, Mittelsachsen, Sächsische Schweiz-Osterzgebirge und der Vogtlandkreis. Diese sollten jedoch differenziert betrachtet werden: Gegenüber dem Basis-Szenario kommt es zu einer deutlichen Steigerung des wirtschaftlichen Potenzials in den Landkreisen Erzgebirgskreis, Sächsische Schweiz sowie Vogtlandkreis, wenn in diesen Landkreisen ein Zubau von Windenergieanlagen in Wäldern und Gebieten mit waldähnlichen Bewuchs, sowie Landschaftsschutzgebieten zugelassen wird. Fraglich ist, ob dieser nennenswerte Anteil des wirtschaftlichen Potenzials auch unter Berücksichtigung

¹⁸ Zu beachten ist, dass eine Ausweitung der Flächen vor dem Hintergrund der bereits weitgehend ausgereizten Nutzung von Bodenflächen kritisch zu betrachten ist. Dabei sind entsprechende Rückwirkungen auf Boden-, Pacht- und Lebensmittelpreise zu erwarten. Im Gegensatz dazu ist gegen eine Nutzung von pflanzlichen Reststoffen für die Biogas und Biospritbereitstellung nichts einzuwenden.

ökologischer Restriktionen in Wald- und Landschaftsschutzgebieten sowie gesellschaftlicher Widerstände erschlossen werden kann. Der geringe Anteil an Windturbinen in Deutschland in Wäldern oder Flächen mit waldähnlichem Bewuchs zeigt, dass Hemmnisse dieser Art tatsächlich bestehen. Weiterhin sollte berücksichtigt werden, ob bei einer Errichtung von Windparks in Wäldern zusätzliche Kosten aufgrund der schlechteren Infrastruktur entstehen, die das wirtschaftlich nutzbare Potenzial tendenziell verringern.

Das wirtschaftliche Potenzial an Windenergie hängt stark von den einzuhaltenden Mindestabständen zur Wohnbebauung sowie der installierten Leistung je Turbine ab. Zwar steigt das wirtschaftliche Potenzial mit leistungsstärkeren Turbinen aufgrund einer besseren Auslastung überproportional an, doch damit einhergehende höhere Naben sowie größere Rotordurchmesser bedingen in der Regel größere Mindestabstände zur Wohnbebauung. Diese verringern wiederum das wirtschaftliche Potenzial deutlich. Der Gesetzentwurf vom 05. Juli 2013 der Freistaaten Bayern und Sachsen zu strengeren Bauvorschriften von Windenergieanlagen ist mit dem in den vergangenen Jahren drastischen Anstieg der Gesamthöhe von Windenergieanlagen und der damit verbundenen als „bedrängend empfundenen Wirkung“ begründet (Freistaat Bayern 2013). Für einen breiten Konsens über den Ausbau von Windenergie seien höhenbezogene Abstandsregelungen, abhängig von unterschiedlichen regionalen Gegebenheiten in den Bundesländern, von bis zu dem 10-fachen der Gesamthöhe notwendig (Freistaat Bayern 2013). Ein Mindestabstand von 2000 Metern zur Wohnbebauung, entsprechend einer Gesamthöhe leistungsstarker Windturbinen der neuesten Generation, hat jedoch erhebliche Auswirkungen auf das wirtschaftliche Potenzial von Windenergie im Freistaat Sachsen. Die Einführung von Mindestabständen von 2000 Metern würde den weiteren Ausbau von Windenergieanlagen nahezu vollständig zum Erliegen bringen. Damit ein Ausbau von Windenergieanlagen bei einem Mindestabstand von 2000 Metern möglich ist, müssen Schutzgebiete der Klasse *V Geschützte Landschaft* genutzt werden. Dies steht jedoch einer breiten Konsensfindung entgegen, so dienen Gebiete dieser Kategorie insbesondere auch als Naherholungsgebiet.

Die ermittelten Potenziale sollen als Grundlage für detaillierte Energiesystemanalysen zur Integration von erneuerbaren Energien dienen und stehen auf Anfrage für weitere wissenschaftliche Arbeiten zur Verfügung.

Literaturverzeichnis

- 50 Hertz (a). *EEG-Anlagenstammdaten (aktueller Stand)*. 2014.
http://www.50hertz.com/cps/rde/xchg/trm_de/hs.xsl/165.htm?rdeLocaleAttr=de&&rdeCOQ=SID-5883D434-FAB308E5 (Zugriff am 22. 02 2014).
- 50 Hertz (b). „EEG Jahresabrechnung.“ <http://www.50hertz.com/de/166.htm> (Zugriff am 08. 11 2013).
- AEE. *Potenzialatlas Bioenergie in den Bundesländern*. Berlin: Agentur für Erneuerbare Energien (AEE) e.V., 2013.
- ASUE. *BHKW-Kenndaten 2011 Module, Anbieter, Kosten*. Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V, 2011.
- Badea, Aurelian Florin. „Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Kerntechnik & Reaktorsicherheit.“ kein Datum. <http://www.ikr.kit.edu/216.php> (Zugriff am 17. April 2013).
- Bayern, Freistaat. „Gesetzesantrag: Entwurf eines Gesetzes zur Ergänzung des Baugesetzbuchs (BauGB).“ 02. 07 2013. <http://www.bundesrat.de/SharedDocs/Drucksachen/2013/0501-600/569-13,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/569-13.pdf> (Zugriff am 07. 11 2013).
- BDEW. *Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2013)*. Berlin: Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V, 2013.
- BiomassenV, BMJV. *Biomassen Verordnung*. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2001.
- BMBF. *BioSicherheit Gentechnik-Pflanzen-Umwelt*. Herausgeber: Bundesministerium für Bildung und Forschung. 2011. <http://www.biosicherheit.de/basisinfo/272.speiseoel-futtermittel-biodiesel.html> (Zugriff am 25. März 2014).
- BMEL. *Meilenstein der Agrarpolitik - Europäische Agrarreform 1997*. Bundesministerium Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, 2005.
- BMEL. *Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 2012*. Münster: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2012.
- BMU. „Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.“ *Windenergie, Bundesländer Initiative*. 01. Februar 2012. <http://www.bmu.de/bmu/parlamentarische-vorgaenge/detailansicht/artikel/ueberblick-zu-den-landesplanerischen-abstandsempfehlungen-fuer-die-regionalplanung-zur-ausweisung-von-windenergiegebieten/> (Zugriff am 15. Dezember 2012).
- Bofinger, Stefan, Doron Callies, Michael Scheibe, Yves-Marie Saint-Drenan, und Kurt Rohrig. *Potenzial der Windenergienutzung an Land*. Berlin: Bundesverband WindEnergie e.V. (Hrsg.), 2011.
- Brückner, Claudia. *Aktuelles zur Biogasproduktion in Sachsen*. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfUG), Freistaat Sachsen, 2012.
- Brückner, Claudia. *Verfahrenstechnik und Betriebswirtschaft sächsischer Biogasanlagen*. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfUG), Freistaat Sachsen, 2008.

- Bundesverband Solarwirtschaft. *Das Netzwerk der Solarbranche*. <http://www.solarwirtschaft.de/> (Zugriff am 15. Mai 2013).
- CORINE Land Cover. *CLC2006*. Umweltbundesamt, DLR-DFD, 2009.
- DBFZ. *Monitoring zur Wirkung des EEG auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse*. Leipzig: Deutsche Biomassen Forschungszentrum, 2010.
- Elsäßer, Martin, Ulrich Keymer, und Reinhard Roßberg. *Biogas aus Gas - Wie Grünlandaufwüchse zur Energieerzeugung beitragen können*. Fachzentrum Land- und Ernährungswirtschaft DLG e.V, 2012.
- ENERCON GmbH. „ENERCON Produktübersicht.“ Aurich, 2013.
- EuPD Resarch. *Sustainable Excellence*. <http://www.eupd-research.com/de/home.html> (Zugriff am 15. Mai 2013).
- Feldwisch, Dr. Norbert. „Umweltgerechter Anbau von Energiepflanzen.“ Schriftreihe, Heft 43/2011, 2011.
- FNR. *Leitfaden Biogas*. Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe e.V, 2010.
- FNR (a). *Basisdaten Bioenergie Deutschland 2012*. Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe e.V, 2012.
- FNR (a). *Biogas*. Herausgeber: Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2013. <http://biogas.fnr.de/> (Zugriff am 11. Februar 2014).
- FNR (b). *Biokraftstoffe*. Herausgeber: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2013. <http://biokraftstoffe.fnr.de/> (Zugriff am 29. Januar 2014).
- FNR (b). *Energiepflanzen für Biogasanlagen*. Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe e.V, 2012.
- Geofabrik. 10. März 2013. <http://download.geofabrik.de/europe/germany/sachsen.html> (Zugriff am 11. März 2013).
- Gruber, Leonhard. *Schätzung der Futtermittelaufnahme bei der Milchkuh*. DLG Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft, 2006.
- Hau, Erich. *Windkraftanlagen - Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit*. 3. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo: Springer, 2003.
- IUCN and UNEP-WCMC. *The World Database on Protected Areas (WDPA) [Online]*, Cambridge, UK: UNEP-WCMC. 2013. www.protectedplanet.net (Zugriff am 11. 01 2013).
- IWR. *Planung einer Biogasanlage*. Herausgeber: Internationales Wirtschaftsforum Regenerativer Energien. 2013. <http://www.iwr.de/bio/biogas/Checkliste-Biogas-Anlage.html> (Zugriff am 25. März 2014).
- Jäkel, Kerstin. *Energetische Verwertung von Biomasse zu Biogas*. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfUG), Freistaat Sachsen, 2003.

- Kaltschmitt, Martin, Andreas Wiese, und Wolfgang Streicher. *Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. Herausgeber: Wolfgang Streicher. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2003.
- Kaltschmitt, Martin, Hans Hartmann, und Hofbauer Hermann. *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2009.
- Kerdoncuff, Pierre. *Modellierung und Bewertung von Prozessketten zur Herstellung von Biokraftstoffen der zweiten Generation*. Universitätsverlag Karlsruhe, 2008.
- Konstantin, Panos. *Praxisbuch Energiewirtschaft: Energiewandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt*. Berlin: Springer, 2009.
- Kost, Christoph, et al. *Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien*. Freiburg: Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2013.
- Kost, Christoph, Thomas Schlegel, Jessica Thomsen, Sebastian Nold, und Johannes Mayer. *Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien*. Freiburg: Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2012.
- Kuhlmann, F., und Thore Toews. *Ökonomische Bewertung des Anbaus und der Nutzung von Energiepflanzen*. Justus-Liebig-Universität Giessen, 2009.
- LfUG. *Landwirtschaftliche Biomasse-Potentiale an Biomasse aus der Landwirtschaft des Freistaates Sachsen zur stofflich-energetischen Nutzung*. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Freistaat Sachsen, 2006.
- MESoR - Management and Exploitation of Solar Resource Knowledge. *Project Mesor*. 29. Januar 2013. <http://project.mesor.net/web/guest/solemi-free> (Zugriff am 18. Februar 2013).
- Moser, Andreas, und Steffen Fiddecke. *Wirtschaftlichkeitskalkulation für Biogasanlagen nach dem EEG 2009*. Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen, 2008.
- Münch, Julia. *Nachhaltigkeit nutzbares Getreidestroh in Deutschland*. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, 2008.
- NASA Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC). *ASTER GDEM*. USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota, 2013.
- Nold, S., et al. „Cost modeling of silicon solar cell production innovation along the PV value chain.“ *European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC)*. Frankfurt, 2012.
- Rausen, Thomas, und Auke Lootsam. *Verfahren der Gärrestaufbereitung*. Witzenhausen-Institut GmbH - Abfallforum, 2008.
- Saena. *Energieportal Sachsen*. Herausgeber: Sächsische Energieagentur GmbH. 2013. <http://www.energieportal-sachsen.de/%28S%28we1dhewby2gadaas5iegerxm%29%29/saena.aspx> (Zugriff am 16. Januar 2014).
- Schmid, Jürgen, und H.P. Klein. *Performance of European Wind Turbines - A Statistical Evaluation from the European Wind Turbine Database EUROWIN*. London, New York: Elsevier Applied Science, 1991.

- Scholz, Yvonne. *Möglichkeiten und Grenzen der Integration verschiedener regenerativer Energiequellen zu einer 100% regenerativer Stromversorgung der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2050*. Berlin: Sachverständigenrat für Umweltfragen, 2010.
- Schwarz, Björn. *Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen der Größenklassen 250kW und 350kW auf Basis des EEG*. Dresden: Fraunhofer IKTS, 2012.
- Sliz-Szkliniarz, Beata, und Joachim Vogt. „GIS-based approach for the evaluation of wind energy potential: A case study for the Kujawsko-Pomorskie Voivodeship.“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15 Ausg.: 1696-1707.
- SMUL. *Leitfaden zur Genehmigung von Windkraftanlagen im Freistaat Sachsen*. Freistaat Sachsen - Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, 2001.
- SMWA. „Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr, Freistaat Sachsen.“ *Freistaat Sachsen - Publikationen*. 31. Dezember 2012. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/16471> (Zugriff am 30. April 2013).
- Solarwatt AG. *Solarwatt - Systemintelligenz*. März 2013.
http://www.solarwatt.de/fileadmin/user_upload/pdf/datenblaetter/datenblaetter_deutsch/SOLARWATT_60_style_dt_02.pdf (Zugriff am 16. April 2013).
- Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen. *Geobasisinformation und Vermessung*. 27. Februar 2013. http://www.landesvermessung.sachsen.de/inhalt/produkte/dhm/3dm/3dm_download.html (Zugriff am 27. Februar 2013).
- statista. *Marktanteil der wichtigsten Windenergieanlagenhersteller in Deutschland nach neu installierter Leistung in den Jahren 2011 und 2012*. 2013.
<http://de.statista.com/statistik/daten/studie/28459/umfrage/marktanteil-der-hersteller-im-bereich-windenergie-seit-2008/> (Zugriff am 12. 06 2013).
- Statistische Landesamt. *Statistische Berichte - Viehbestände in den landwirtschaftlichen Betrieben im Freistaat Sachsen – Agrarstrukturerhebung*. Statistische Landesamt Sachsen, 2007.
- Statistisches Landesamt (a). *Statistischer Bericht - Viehwirtschaft im Freistaat Sachsen 2012*. Statistisches Landesamt Sachsen, 2012.
- Statistisches Landesamt (b). „Erträge ausgewählter Fruchtarten im Freistaat Sachsen ab 1991.“ 2013.
https://www.statistik.sachsen.de/download/050_W-Land-Forstwirt/Zeitreihe_Ertraege.pdf (Zugriff am 20. Januar 2014).
- Statistisches Landesamt (b). *Statistischer Bericht - Bodennutzungshaupterhebung im Freistaat Sachsen 2012*. Statistisches Landesamt Sachsen, 2012.
- Statistisches Landesamt (a). *Regionaldaten Kreisstatistik Sachsen*. 2013.
<http://www.statistik.sachsen.de/apps11/Kreistabelle/servlet/KartenServlet?Jahr=2013> (Zugriff am 22. Januar 2014).
- Troen, Ib, und Erik Lundtag Petersen. *Europäischer Windatlas*. Roskilde: Risø, 1990.
- VDB. „Daten Bioethanol in Deutschland 2011.“ Herausgeber: Verband der Deutschen Biokraftstoffindustrie e.V. 2012. <http://www.biokraftstoffverband.de/index.php/daten-und-fakten-148.html> (Zugriff am 6. Mai 2014).

- Wallasch, Kathrin, Kurt Rehfeldt, und Jan Wallasch. *Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichtes 2011 gemäß § 65 EEG*. Varel: Deutsche WindGuard, 2011.
- Weiß, Daniel, und Claudia Brückner. *Aufarbeitung landwirtschaftlicher Biomasse für den vergärungsprozess*. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfUG), Freistaat Sachsen, 2008.
- Wilfert, Ronny, Nill Moritz, und Alexander Schattauer. *Biogasgewinnung aus Gülle, organischen Abfällen und aus angebauter Biomasse – Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse*. Leipzig: IE Institut für Energetik und Umwelt, 2004.

Anhang

Tabelle A.1: Technisches und wirtschaftliches Potenzial an Windenergie auf Stadt- und Landkreis-Ebene

		BAUTZEN	CHEMNITZ (STADT)	DRESDEN (STADT)	ERZGEBIRGS- KREIS	GÖRLITZ	LEIPZIG	LEIPZIG (STADT)	MEIßEN	MITTEL- SACHSEN	NORD- SACHSEN	SÄCHS. SCHWEIZ / OSTERZ- GEBIRGE	VOGTLAND- KREIS	ZWICKAU	Σ	
WINDENERGIE	Basis min	Technisches Potenzial [GWh]	7.183,86	240,58	248,62	2.224,74	8.502,30	5.386,70	735,61	6.024,89	8.994,53	6.664,30	2.640,63	2.823,62	2.469,27	54.139,64
		Wirtschaftliches Potenzial [GWh]	0,00	0,20	0,00	1.123,78	304,42	0,00	0,00	0,00	2.286,28	0,00	431,72	112,20	3,30	4.261,89
		LCOE-av [EUR/kWh]	0,0000	0,0902	0,0000	0,0799	0,0761	0,0000	0,0000	0,0000	0,0822	0,0000	0,0856	0,0785	0,0533	--
	Basis max	Technisches Potenzial [GWh]	11.023,23	483,67	551,30	6.080,88	10.419,17	8.915,04	842,72	9.807,78	14.706,74	12.721,90	6.344,81	6.530,98	4.220,00	92.648,22
		Wirtschaftliches Potenzial [GWh]	12,94	11,18	3,20	3.357,14	517,81	0,00	0,00	0,00	3.286,49	0,00	2.120,57	597,01	6,55	9.912,91
		LCOE-av [EUR/kWh]	0,0706	0,0886	0,0893	0,0784	0,0779	0,0000	0,0000	0,0000	0,0810	0,0000	0,0790	0,0817	0,0579	--
	Wald min	Technisches Potenzial [GWh]	10.889,62	302,14	314,71	4.207,49	13.974,04	5.858,12	750,78	6.491,92	10.123,77	7.271,71	3.134,83	4.392,93	2.994,99	70.707,05
		Wirtschaftliches Potenzial [GWh]	0,00	0,20	0,00	1.936,43	531,20	0,00	0,00	0,00	2.587,21	0,00	592,54	256,30	5,65	5.909,53
		LCOE-av [EUR/kWh]	0,0000	0,0902	0,0000	0,0797	0,0779	0,0000	0,0000	0,0000	0,0816	0,0000	0,0858	0,0807	0,0622	--
	Wald max	Technisches Potenzial [GWh]	17.727,25	697,46	1.048,92	17.680,70	17.412,72	10.635,86	866,56	11.300,46	18.362,23	16.274,38	10.872,45	13.142,39	5.507,56	141.528,93
		Wirtschaftliches Potenzial [GWh]	243,64	19,60	3,20	9.748,94	979,87	0,00	0,00	0,00	4.667,19	0,00	3.753,08	2.423,55	11,51	21.850,58
		LCOE-av [EUR/kWh]	0,0780	0,0881	0,0893	0,0772	0,0788	0,0000	0,0000	0,0000	0,0800	0,0000	0,0784	0,0807	0,0600	--

Tabelle A.2: Technisches und wirtschaftliches Potenzial an Photovoltaik auf Stadt- und Landkreis-Ebene

		BAUTZEN	CHEMNITZ (STADT)	DRESDEN (STADT)	ERZGEBIRGS- KREIS	GÖRLITZ	LEIPZIG	MEIßEN	MITTEL- SACHSEN	NORD- SACHSEN	SÄCHS. SCHWEIZ / OSTERZ- GEBIRGE	VOGTLAND- KREIS	ZWICKAU	Σ	
PHOTOVOLTAIK	Basis-Szenario	Technisches Potenzial [GWh]	1.014,17	1.129,38	1.828,53	282,63	646,34	1.655,94	605,88	715,74	307,33	434,99	373,06	414,98	9.408,96
		Wirtschaftliches Potenzial [GWh]	428,49	346,35	700,98	71,13	278,78	637,84	259,56	234,04	135,36	160,64	103,86	117,75	3.474,78
		LCOE-av [EUR/kWh]	0,1490	0,1509	0,1499	0,1536	0,1481	0,1506	0,1487	0,1506	0,1494	0,1508	0,1529	0,1519	--
	Szenario - Wenig PV Zubau	Technisches Potenzial [GWh]	1.166,30	1.298,79	2.102,81	325,02	743,29	1.559,38	696,76	823,10	353,43	500,24	429,02	477,23	10.475,36
		Wirtschaftliches Potenzial [GWh]	637,28	665,28	1.103,21	154,12	423,16	1.002,80	390,92	426,13	200,25	285,92	209,59	239,64	5.738,28
		LCOE-av [EUR/kWh]	0,1405	0,1438	0,1416	0,1461	0,1401	0,1421	0,1406	0,1434	0,1408	0,1433	0,1453	0,1448	--
	Szenario - Viel PV Zubau	Technisches Potenzial [GWh]	1.377,40	1.533,87	2.483,41	383,85	877,82	1.841,62	822,87	972,08	417,40	590,78	506,67	563,61	12.371,40
		Wirtschaftliches Potenzial [GWh]	1.129,37	1.150,87	1.957,61	256,08	734,04	1.776,66	683,93	757,73	353,99	512,71	358,53	407,55	10.079,08
		LCOE-av [EUR/kWh]	0,1331	0,1350	0,1341	0,1339	0,1326	0,1343	0,1331	0,1351	0,1335	0,1349	0,1346	0,1350	--

Tabelle A.3: Technisches Potenzial an Biogas auf Stadt- und Landkreis-Ebene

		BAUTZEN	CHEMNITZ (STADT)	DRESDEN (STADT)	ERZGEBIRGSKREIS	GÖRLITZ	LEIPZIG	LEIPZIG (STADT)	MEIßEN	MITTELSACHSEN	NORDSACHSEN	SÄCHS. SCHWEIZ / OSTERZGEBIRGE	VOGTLANDKREIS	ZWICKAU	Σ
BIOGAS	<i>Dauergrünland</i>	0,02	0	0	0,09	0,1	0	0	0,01	0	0	0,08	0,03	0	0,33
	<i>Getreide</i>	0,38	0	0	0	0,31	0,63	0	0,38	0,65	0,23	0,19	0,02	0,13	2,92
	<i>Pflanzen zur Grünernte</i>	0,25	0,02	0,00	0,05	0,3	0,28	0,00	0,14	0,24	0,00	0,11	0,09	0,09	1,57
	<i>Getreide- und Rapsstroh</i>	0,16	0,01	0	0,07	0,14	0,21	0,02	0,14	0,26	0,24	0,11	0,08	0,11	1,55
	<i>Tierbestand</i>	0,16	0,01	0,01	0,16	0,13	0,12	0,01	0,13	0,26	0,15	0,12	0,11	0,11	1,48
	Σ	0,97	0,04	0,01	0,37	0,98	1,24	0,03	0,8	1,41	0,62	0,61	0,33	0,44	

Schriften des Lehrstuhls für Energiewirtschaft, TU Dresden

Technische Universität Dresden

Fakultät Wirtschaftswissenschaften

Lehrstuhl für Energiewirtschaft

In der Schriftenreihe sind auf Qucosa®, dem sächsischen Dokumenten- und Publikationsserver, bisher erschienen:

- Band 1** **Managing Congestion and Intermittent Renewable Generation in Liberalized Electricity Markets**
(Friedrich Kunz)
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-108793>
- Band 2** **Der Stromausfall in München - Einfluss auf Zahlungsbereitschaften für Versorgungssicherheit und auf die Akzeptanz Erneuerbarer Energien**
(Daniel K. J. Schubert, Thomas Meyer, Alexander von Selasinsky, Adriane Schmidt, Sebastian Thuß, Niels Erdmann und Mark Erndt)
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-117777>
- Band 3** **Abschätzung der Entwicklung der Netznutzungsentgelte in Deutschland**
(Fabian Hinz, Daniel Iglhaut, Tobias Frevel, Dominik Möst)
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-141381>
- Band 4** **Potenziale der Elektrizitätserzeugung aus erneuerbaren Ressourcen im Freistaat Sachsen**
(Hannes Hobbie, Vera Schippers, Michael Zipf, Dominik Möst)
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-153350>

Kurzfassung

Der Freistaat Sachsen verfügt über große Potenziale hinsichtlich der Elektrizitätserzeugung aus Windkraft, Photovoltaik, sowie Biogas aus landwirtschaftlicher Biomasse. Im Rahmen dieser großteilig auf geographischen Informationssystemen (GIS) basierenden Analyse wird für die Ermittlung des wirtschaftlichen Potenzials bei Windenergie und Photovoltaik jeweils die EEG-Vergütung nach dem EEG 2012 bei Inbetriebnahme der Anlagen im Jahr 2013 herangezogen. Bei voller Ausschöpfung aller Flächen beträgt das Potenzial etwa 43% des Bruttostrombedarfes in Sachsen. Neben dem Potenzial zur Stromerzeugung entspricht das technische Potenzial an Biogas von Überschussflächen nach Abzug des Bedarfes an Biomasse zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion ca. 20,5% des Erdgasverbrauches im Freistaat. Bei selben Annahmen können in einem alternativen Nutzungspfad ca. 4,5 TWh an Biokraftstoffen hergestellt werden. Im Einzelnen können durch die Nutzung von Windenergie zwischen 4,3 und 9,9 TWh ohne Berücksichtigung von Waldflächen an Elektrizität pro Jahr bereitgestellt werden. Wird eine Turbine einer höheren Leistungsklasse unterstellt, wie dies für die nächsten Jahre projiziert wird, liegt das wirtschaftliche Potenzial sogar bei 22,6 TWh. Das wirtschaftliche Potenzial zur Stromerzeugung durch Photovoltaik auf Dachflächen liegt bei 3,5 TWh. Im Gegensatz zum wirtschaftlichen Potenzial bei der Windenergie und der Photovoltaik, handelt es sich bei der Biomasse um das technische Potenzial.

Zu den Autoren

Hannes Hobbie, Dipl.-Wirtsch.-Ing., Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der Leibniz Universität Hannover sowie Lunds Tekniska Högskola, seit 2012 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Energiewirtschaft an der TU Dresden

Vera Schippers, Dipl.-Ing. (FH), Studium des Vermessungswesens an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden mit Schwerpunkt Geoinformatik, seit 2013 Wissenschaftliche Hilfskraft am Lehrstuhl für Energiewirtschaft an der TU Dresden

Michael Zipf, Master of Science, Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der TU Dresden, seit 2012 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Energiewirtschaft an der TU Dresden

Prof. Dr. habil. Dominik Möst, Studium des Wirtschaftsingenieurwesens am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und der ENSGI Grenoble, 2002-2010 Promotion und Habilitation am Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion am KIT, seit 2010 Inhaber des Lehrstuhls für Energiewirtschaft an der TU Dresden