

# Klimaschutz durch Biokohle: Potentiale und Kosten für den Großraum Berlin

Von Jakob Medick, Isabel Teichmann und Claudia Kemfert

Mit Hilfe der sogenannten hydrothermalen Carbonisierung kann Biomasse in ein kohleartiges Produkt umgewandelt werden, das auch als Biokohle oder HTC-Kohle bezeichnet wird. Diese HTC-Kohle eignet sich sowohl zur Einzelverbrennung in Blockheizkraftwerken als auch zur Mitverbrennung in konventionellen Kohlekraftwerken. In dieser Studie werden das Treibhausgasvermeidungspotential und die dazugehörigen Kosten berechnet, wenn Laub und Grasschnitt aus dem Großraum Berlin für die Herstellung von HTC-Kohle genutzt würden. Dabei wird angenommen, dass die HTC-Kohle einen Teil der in Berlin verwendeten Steinkohle zur Gewinnung von Strom und Wärme ersetzt. Je nach Herkunft der Grünabfälle werden ein städtisches, ein ländlich-städtisches und ein ländliches Szenario spezifiziert, die alle gleichzeitig realisierbar sind. Zusammengerechnet beträgt das Treibhausgasvermeidungspotential mehr als 70 000 Tonnen Kohlenstoffdioxidäquivalente (CO<sub>2</sub>e) pro Jahr. Dies entspricht ungefähr 1,6 Prozent des Treibhausgasreduktionsziels, das sich Berlin für das Jahr 2020 gegenüber 2005 gesetzt hat. Die Treibhausgasvermeidungskosten belaufen sich allerdings auf ein Mehrfaches von dem, was eine Tonne Kohlenstoffdioxid derzeit im Europäischen Emissionshandel kostet. Dabei zeigt ein Vergleich der Kosten in den verschiedenen Szenarien, dass die Mitverbrennung der HTC-Kohle in einem bestehenden Kohlekraftwerk mit ungefähr 75 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>e gegenüber der Einzelverbrennung in einem neuen Blockheizkraftwerk noch vergleichsweise kostengünstig ist. Somit könnte HTC-Kohle in der Zeit bis zum vollständigen Kohleausstieg einen gewissen Beitrag zur Minderung des Treibhausgasausstoßes von Kohlekraftwerken leisten.

Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, die jährlichen Treibhausgasemissionen Deutschlands bis zum Jahr 2050 schrittweise um 80 bis 95 Prozent gegenüber dem Niveau des Jahres 1990 zu senken.<sup>1</sup> Eine entscheidende Rolle kommt dabei erneuerbaren Energien zu, die zum Beispiel aus Wind, Sonne und Biomasse gewonnen werden und fossile Brennstoffe ersetzen sollen. So soll der Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch im Jahr 2050 mindestens 80 Prozent betragen.<sup>2</sup> Das Land Berlin plant sogar einen kompletten Ausstieg aus fossiler Kohle bis zum Ende des Jahres 2030.<sup>3</sup>

Zur Erreichung dieser Ziele ist Deutschland insbesondere auf Wind- und Sonnenenergie angewiesen, denn Biomasse besitzt hierzulande mengenmäßig ein geringeres Potential.<sup>4</sup> Wind- und Sonnenenergie fluktuieren jedoch stark. Ihre Integration in das Stromsystem erfordert daher zahlreiche Anpassungsmaßnahmen wie Energiespeicherung, Nachfragemanagement, Netzausbau und flexible Reservekraftwerke.<sup>5</sup> Dagegen hat Biomasse den Vorteil, jederzeit einsatzbereit zu sein. In einem von erneuerbaren Energien dominierten Stromsystem kann sie somit trotz ihrer mengenmäßigen Beschränkung dazu beitragen, den Stromspeicherbedarf zu reduzieren und die Systemkosten zu verringern.<sup>6</sup>

Biomasse ist jedoch auch eine umstrittene Energiequelle. Insbesondere der Pflanzenanbau zur Energiegewinnung

**1** Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Hrsg.) (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, Berlin.

**2** § 1 Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 2017, veröffentlicht im Bundesgesetzblatt 2016 I 49, 2258-2310.

**3** Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz (2017): Berlin treibt Beendigung der Kohlenutzung voran. Pressemitteilung vom 9. Mai 2017 (online verfügbar, abgerufen am 7. August 2017. Dies gilt auch für alle anderen Online-Quellen dieses Berichts, sofern nicht anders vermerkt).

**4** André Brosowski et al. (2016): A review of biomass potential and current utilisation – Status quo for 93 biogenic wastes and residues in Germany. Biomass and Bioenergy 95, 257-272.

**5** Wolf-Peter Schill (2014): Residual load, renewable surplus generation and storage requirements in Germany. Energy Policy 73, 65-79 (online verfügbar).

**6** Wolf-Peter Schill und Alexander Zerrahn (2017): Long-run power storage requirements for high shares of renewables: Results and sensitivities. Renewable and Sustainable Energy Reviews (im Druck, online verfügbar).

und seine Rolle für die globale Ernährungssituation und für Emissionen aus Landnutzungsänderungen werden kontrovers diskutiert.<sup>7</sup> Dies hat den Fokus auf Bioabfälle zur Energiegewinnung gelenkt, wie zum Beispiel auf kommunale Grünabfälle. Auf der Suche nach effizienten Umwandlungsverfahren für solche Biomassen, die oft einen hohen Wassergehalt, einen geringen Heizwert und eine heterogene Qualität haben, wird die hydrothermale Carbonisierung (HTC) als eine viel versprechende Technologie aufgeführt.<sup>8</sup>

Im HTC-Verfahren wird die Biomasse in ein braunkohleähnliches Produkt umgewandelt, so genannte HTC-Kohle, die als Festbrennstoff genutzt werden kann (Kasten 1). Die HTC-Kohle eignet sich dabei sowohl zur Einzelverbrennung in Biomasse-Blockheizkraftwerken als auch zur Mitverbrennung in konventionellen Kohlekraftwerken, die je nach der Beschaffenheit der HTC-Kohle nahezu unbegrenzt erfolgen kann.<sup>9</sup> Die Vor- und Nachteile des HTC-Verfahrens bei der Umwandlung von Bioabfällen gegenüber der direkten Verbrennung von Biomasse sowie gegenüber der Biogasherstellung sind in Kasten 2 dargestellt.

Eine kürzlich erschienene Fallstudie des DIW Berlin hat das Treibhausgasvermeidungspotential und die dazugehörigen Kosten von HTC-Kohle aus Laub und Grasnicht als regenerative Energiequelle im Großraum Berlin untersucht.<sup>10</sup> Zum Großraum Berlin zählen dabei neben den Berliner Stadtbezirken die brandenburgischen Landkreise Havelland, Potsdam-Mittelmark und Teltow-Fläming sowie die in Brandenburg gelegenen kreisfreien Städte Brandenburg an der Havel und Pots-

**7** Mark W. Rosegrant und Siwa Msangi (2014): Consensus and contention in the food-versus-fuel debate. *Annual Review of Environment and Resources* 39, 271-294; Timothy D. Searchinger et al. (2009): Fixing a critical climate accounting error. *Science* 326 (5952), 527-528.

**8** Maria-Magdalena Titirici, Arne Thomas und Markus Antonietti (2007): Back in the black: Hydrothermal carbonization of plant material as an efficient chemical process to treat the CO<sub>2</sub> problem? *New Journal of Chemistry* 31 (6), 787-789; Axel Funke und Felix Ziegler (2010): Hydrothermal carbonization of biomass: A summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining* 4 (2), 160-177; Judy A. Libra et al. (2011): Hydrothermal carbonization of biomass residuals: A comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels* 2 (1), 89-124.

**9** Für andere stoffliche Verwendungsmöglichkeiten von HTC-Kohle, siehe Libra et al. (2011), a. a. O. sowie M. Toufiq Reza et al. (2014): Hydrothermal carbonization of biomass for energy and crop production. *Applied Bioenergy* 1 (1), 11-29.

**10** Jakob Medick, Isabel Teichmann und Claudia Kemfert (2017): Hydrothermal carbonization (HTC) of green waste: An environmental and economic assessment of HTC coal in the metropolitan region of Berlin, Germany. DIW Discussion Paper 1690. Die Studie basiert auf der Masterarbeit „Hydrothermal carbonization of green wastes: A techno-economic assessment of sustainable organic waste management in the metropolitan region of Berlin“, die von Jakob Medick im Jahr 2014 an der Humboldt-Universität zu Berlin eingereicht worden ist. Die Studie wurde finanziell durch die Leibniz Gemeinschaft unterstützt (SAW-2012-ATB-3).

Kasten 1

**Hydrothermale Carbonisierung und HTC-Kohle**

Die hydrothermale Carbonisierung (HTC) geht zurück auf Bergius (1913).<sup>1</sup> Sie ist ein thermochemisches Umwandlungsverfahren, bei der Biomasse in Wasser, unter erhöhtem Druck und ohne Sauerstoffzufuhr für die Dauer von einigen Minuten bis zu mehreren Stunden auf bis zu 180 bis 280 Grad Celsius erhitzt wird.<sup>2</sup> Dabei zerfällt die Biomasse in einen kohlenstoffreichen Feststoff, die HTC-Kohle, sowie gasförmige und flüssige Nebenprodukte.

Die Masseausbeute der HTC-Kohle beträgt in der Regel 50 bis 80 Prozent der Ausgangsbiomasse bezogen auf das Trockengewicht.<sup>3</sup> Im Durchschnitt finden sich 70 Prozent des in der Biomasse enthaltenen Kohlenstoffs in der HTC-Kohle wieder.<sup>4</sup> Eine Tonne HTC-Kohle hat einen höheren Kohlenstoffgehalt (48 bis 72 Prozent) als eine Tonne der Ausgangsbiomasse (45 bis 55 Prozent).<sup>5</sup> Dementsprechend besitzt HTC-Kohle einen höheren oberen Heizwert (19 bis 29 Megajoule pro Kilogramm) als die Biomasse (15 bis 22 Megajoule pro Kilogramm), der zudem dem oberen Heizwert von Braunkohle ähnelt (25 Megajoule pro Kilogramm).<sup>6</sup> Die Wasserstoff-/Kohlenstoff- und Sauerstoff-/Kohlenstoff-Verhältnisse von HTC-Kohle reichen ebenfalls nahe an diejenigen von Braunkohle heran.<sup>7</sup>

**1** Friedrich Bergius (1913): Die Anwendung hoher Drucke bei chemischen Vorgängen und eine Nachbildung des Entstehungsprozesses der Steinkohle. Halle (Saale).

**2** Judy A. Libra et al. (2011): Hydrothermal carbonization of biomass residuals: A comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels* 2 (1), 89-124; M. Toufiq Reza et al. (2014): Hydrothermal carbonization of biomass for energy and crop production. *Applied Bioenergy* 1 (1), 11-29.

**3** Libra et al. (2011), a. a. O.

**4** Hans-Günter Ramke, Dennis Blöhe und Hans-Joachim Lehmann (2012): Wissenschaftlich-technische Grundlagen der Hydrothermalen Carbonisierung organischer Siedlungsabfälle. *Müll und Abfall* 9, 476-483.

**5** Reza et al. (2014), a. a. O. Die Prozentangaben beziehen sich auf verschiedene Hölzer, Gras und landwirtschaftliche Restprodukte.

**6** Reza et al. (2014), a. a. O. Die oberen Heizwerte beziehen sich auf die aschefreie Trockenmasse.

**7** Axel Funke und Felix Ziegler (2010): Hydrothermal carbonization of biomass: A summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining* 4 (2), 160-177; Nicole D. Berge (2011): Hydrothermal carbonization of municipal waste streams. *Environmental Science & Technology* 45 (13), 5696-5703; Ramke, Blöhe, Lehmann (2012), a. a. O.; Ivo Oliveira, Dennis Blöhe und Hans-Günter Ramke (2013): Hydrothermal carbonization of agricultural residues. *Bioresource Technology* 142, 138-146.

Kasten 2

**Vor- und Nachteile des HTC-Verfahrens**

Für das HTC-Verfahren sollte die Biomasse in der Regel einen Wassergehalt von 75 bis 90 Prozent aufweisen.<sup>1</sup> Im Gegensatz zur direkten Verbrennung von Biomasse kann die hydrothermale Carbonisierung daher feuchte Biomasse verarbeiten, ohne sie vorher energieintensiv trocknen zu müssen. Dies erweitert das Spektrum der Biomassen, die als Festbrennstoff genutzt werden können, um feuchte Bioabfälle wie Klärschlamm, Gülle und organische Siedlungsabfälle.<sup>2</sup>

Gegenüber der direkten Verbrennung von Biomasse führt die Verbrennung von HTC-Kohle zu geringerer Verschlackung und Verschmutzung.<sup>3</sup> Außerdem ist die Verbrennung von HTC-Kohle mit erhöhten maximalen Gewichtsabnahmeraten, erhöhten Zündtemperaturen und erhöhten Verbrennungstemperaturen verbunden.<sup>4</sup> Als ein homogener Festbrennstoff mit einer höheren Energiedichte ist die HTC-Kohle während Transport, Lagerung und Verbrennung darüber hinaus leichter zu handhaben als die Ausgangsbiomasse.

Für einige feuchte Biomassen kann das HTC-Verfahren zur Energiegewinnung sogar geeigneter sein als deren Umwandlung in Biogas. So führt die anaerobe Gärung von Laub nur zu einer sehr geringen Ausbeute an Methan (CH<sub>4</sub>), die von 15 bis 25 Kubikmetern CH<sub>4</sub> pro Tonne Frischmasse reicht.<sup>5</sup> Obwohl

die Vergärung von Grasschnitt mit höheren Methanausbeuten von 90 Kubikmetern CH<sub>4</sub> pro Tonne Frischmasse verbunden ist,<sup>6</sup> kann sie technische Schwierigkeiten bereiten, wie zum Beispiel eine verstärkte Notwendigkeit zum Rühren und eine häufige Beseitigung von Ablagerungen.<sup>7</sup>

Eine wesentliche Herausforderung des HTC-Verfahrens besteht im Umgang mit dem HTC-Prozesswasser, das unweigerlich verbleibt. Das Prozesswasser beinhaltet eine Vielzahl an gelösten organischen (und anorganischen) Verbindungen.<sup>8</sup> Dies reduziert die Effizienz des HTC-Verfahrens, da der im Prozesswasser gelöste Kohlenstoff nicht zur Energiegewinnung genutzt werden kann – es sei denn, das Prozesswasser wird in den HTC-Prozess zurückgespeist, um die Kohlenstoff- und Energieausbeute der HTC-Kohle zu erhöhen,<sup>9</sup> oder es wird zur Biogasherstellung genutzt.<sup>10</sup> In jedem Fall muss das restliche HTC-Prozesswasser vor der Entsorgung behandelt werden.<sup>11</sup>

1 Judy A. Libra et al. (2011): Hydrothermal carbonization of biomass residuals: A comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels* 2 (1), 89–124.

2 Libra et al. (2011), a. a. O.

3 M. Toufiq Reza et al. (2014): Hydrothermal carbonization of biomass for energy and crop production. *Applied Bioenergy* 1 (1), 11–29.

4 Zhengang Liu et al. (2013): Production of solid biochar fuel from waste biomass by hydrothermal carbonization. *Fuel* 103, 943–949.

5 Ingenieurconsulting Umwelt und Bau (ICU) (2011): Hochwertige und klimaschonende Verwertung von Mähgut und Laub im Land Berlin. In Kooperation mit Frank Riesbeck. Endbericht für Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz. Berlin.

6 ICU (2011), a. a. O.

7 Annette Prochnow et al. (2009): Bioenergy from permanent grassland – A review. 1. Biogas. *Bioresource Technology* 100 (21), 4931–4944.

8 Axel Funke und Felix Ziegler (2010): Hydrothermal carbonization of biomass: A summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining* 4 (2), 160–177.

9 Jan Stemann, Anke Putschew und Felix Ziegler (2013): Hydrothermal carbonization: Process water characterization and effects of water recirculation. *Bioresource Technology* 143, 139–146.

10 Benjamin Wirth, Jan Mumme und Berit Erlach (2012): Anaerobic treatment of waste water derived from hydrothermal carbonization. Proceedings of the 20th European Biomass Conference and Exhibition, 18–22 June 2012, Milan, Italy, 683–692.

11 Stemann, Putschew, Ziegler (2013), a. a. O.; Wirth, Mumme, Erlach (2012), a. a. O.

dam. Die technischen Daten für die Herstellung der HTC-Kohle beruhen weitestgehend auf Angaben, die von SunCoal Industries GmbH, einem Hersteller von HTC-Anlagen aus Ludwigsfelde, Brandenburg, zur Verfügung gestellt wurden. Um möglichst realistisch zu sein, hat sich die Fallstudie hinsichtlich der verfügbaren Infrastruktur außerdem eng an existierenden Unternehmen der Abfall- und Energiewirtschaft orientiert, insbesondere an der Berliner Stadtreinigung (BSR) und der Vattenfall GmbH. Die Annahmen der Studie sind jedoch

rein hypothetisch und haben nichts mit den aktuellen Geschäften dieser Unternehmen zu tun.<sup>11</sup>

11 Wir danken SunCoal Industries für die Daten, die sie zur Verfügung gestellt haben, und für die enge Zusammenarbeit mit Jakob Medick während des Schreibens seiner Masterarbeit. Außerdem danken wir der BSR, Vattenfall und dem Ingenieurbüro Ingenieurconsulting Umwelt und Bau (ICU) für den regen Gedankenaustausch mit Jakob Medick und die Unterstützung während seiner Masterarbeit.

Tabelle

**Eckpunkte der drei HTC-Szenarien**

	Städtisches Szenario	Ländlich-städtisches Szenario	Ländliches Szenario
Ursprung der Biomasse	Laub und Grasschnitt aus Berliner Stadtbezirken (gesammelt von der BSR und den Grünflächenämtern)	Laub und Grasschnitt aus Berliner Stadtbezirken (gesammelt von privaten Garten- und Landschaftsbauunternehmen) sowie Grasschnitt aus Brandenburg an der Havel, Havelland und Potsdam	Grasschnitt aus Potsdam-Mittelmark und Teltow-Fläming
Kapazität der HTC-Anlage	55 000 Tonnen aufbereitete Frischmasse/Jahr	55 000 Tonnen aufbereitete Frischmasse/Jahr	55 000 Tonnen aufbereitete Frischmasse/Jahr
Genutztes Biomassepotential	73 701 Tonnen Frischmasse/Jahr	75 621 Tonnen Frischmasse/Jahr	81 361 Tonnen Frischmasse/Jahr
Standort und Betreiber der HTC-Anlage	Müllheizkraftwerk Ruhleben (BSR)	Kohleheizkraftwerk Reuter West (Vattenfall)	Kompostierungsanlage in Jühnsdorf
Art und Standort der HTC-Kohle-Verbrennung	Einzelverbrennung am Standort der HTC-Anlage in einem neu errichteten Biomasse-Blockheizkraftwerk	Mitverbrennung im existierenden Kohleheizkraftwerk Reuter West	Mitverbrennung im existierenden Kohleheizkraftwerk Reuter West
Aufbereitung und Lagerung der Biomasse	Hennickendorf	Ahrensfelde, Brandenburg an der Havel, Nauen und Potsdam	Ludwigsfelde und Werder
Transportstufen	1. Stufe: Transport der BSR-Laubsäcke von den einzelnen Sammelstellen zu drei Zwischen-sammelstellen 2. Stufe: Transport der frischen Biomasse von den (Zwischen-)Sammelstellen zum Standort der Biomasseaufbereitung und -lagerung 3. Stufe: Transport der aufbereiteten Biomasse zur HTC-Anlage	1. Stufe: Transport der frischen Biomasse von den Sammelstellen zu den Standorten der Biomasseaufbereitung und -lagerung 2. Stufe: Transport der aufbereiteten Biomasse zur HTC-Anlage	1. Stufe: Transport der frischen Biomasse von den Sammelstellen zu den Standorten der Biomasseaufbereitung und -lagerung 2. Stufe: Transport der aufbereiteten Biomasse zur HTC-Anlage 3. Stufe: Transport der HTC-Kohle zum Standort der HTC-Kohle-Verbrennung

Quelle: Eigene Annahmen.

© DIW Berlin 2017

**Drei Szenarien für HTC-Kohle im Großraum Berlin**

Die Fallstudie umfasst ein städtisches, ein ländlich-städtisches und ein ländliches Szenario. Alle drei Szenarien können gleichzeitig realisiert werden, da sie unterschiedliche Biomassen für die Herstellung der HTC-Kohle nutzen. Im städtischen Szenario werden nur Laub und Grasschnitt aus den Berliner Stadtbezirken verwendet, die von der BSR und den Grünflächenämtern gesammelt werden. Im ländlich-städtischen Szenario wird neben Laub und Grasschnitt aus den Sammlungen privater Garten- und Landschaftsbauunternehmen in den Berliner Stadtbezirken auch Grasschnitt aus Brandenburg an der Havel, Havelland und Potsdam herangezogen. Das ländliche Szenario beruht ausschließlich auf Grasschnitt aus Potsdam-Mittelmark und Teltow-Fläming.

In allen Szenarien wird die Biomasse in eine HTC-Anlage gespeist, die jährlich 55 000 Tonnen Frischmasse verarbeiten kann, die von Störstoffen wie Steinen, Sand und Plastik befreit ist. Da die Ausgangsbiomassen zu unterschiedlichen Graden mit solchen Materialien verunreinigt sind, benötigt das städtische Szenario pro Jahr 73 701 Tonnen Frischmasse (Tabelle), um 55 000 Tonnen aufbereitete Frischmasse zu erhalten. Im länd-

lich-städtischen und ländlichen Szenario sind es jährlich je 75 621 Tonnen beziehungsweise 81 361 Tonnen Frischmasse.

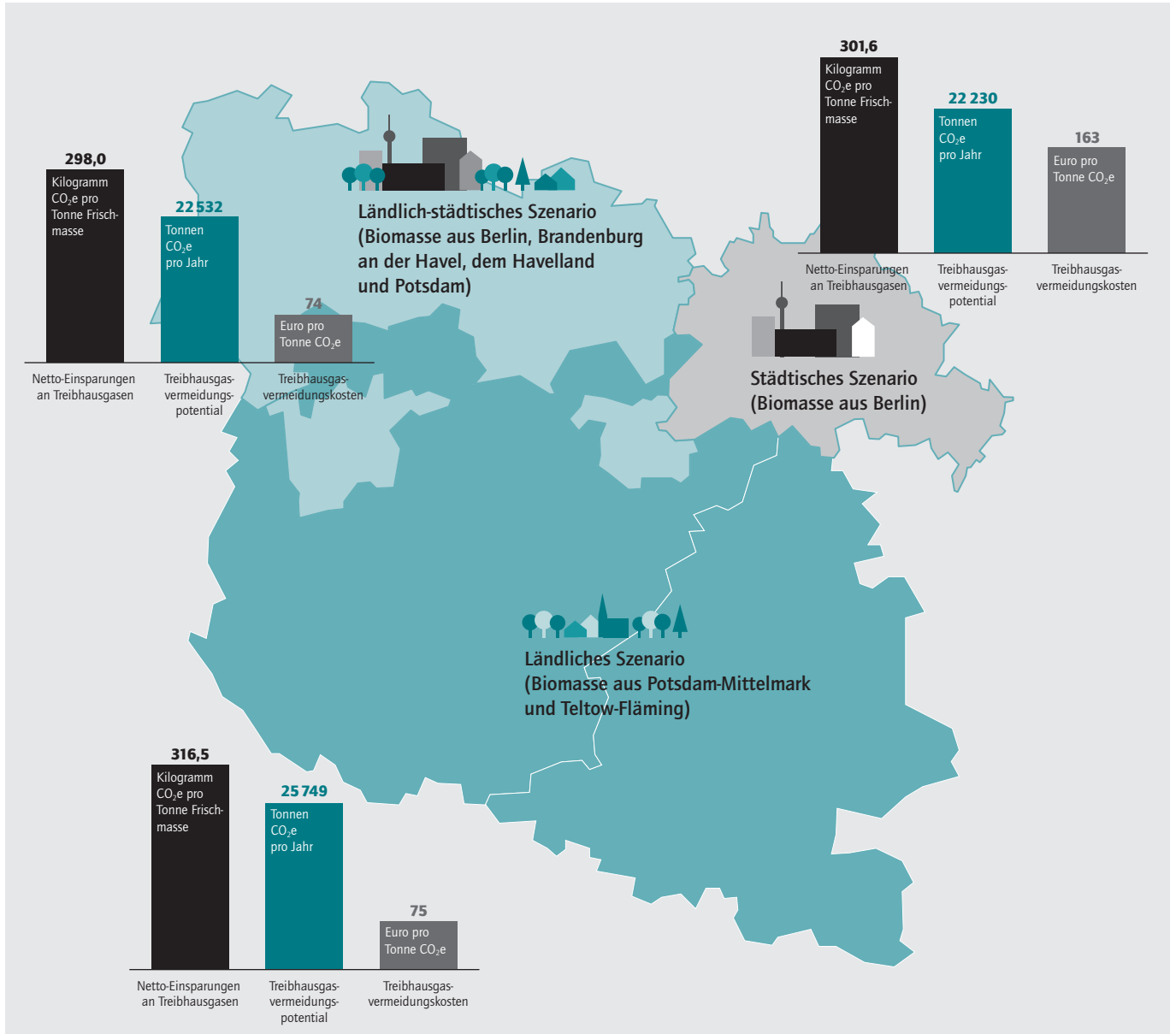
Neben dem geografischen Ursprung der Biomasse unterscheiden sich die Szenarien auch dahingehend, wo und von wem die HTC-Anlage errichtet wird, wo und wie die HTC-Kohle verfeuert wird, wo die Biomasse für die HTC-Kohle-Herstellung aufbereitet und gelagert wird und welche Transportstufen es dementsprechend gibt.

Im städtischen Szenario nehmen wir an, dass die BSR die HTC-Anlage am Standort des Müllheizkraftwerks Ruhleben betreibt. An gleicher Stelle wird ein Biomasse-Blockheizkraftwerk zur Einzelverbrennung der HTC-Kohle errichtet. Aufgrund von Platzmangel am Standort Ruhleben wird die Biomasse außerhalb Berlins aufbereitet und gelagert. Das logistische Konzept umfasst einen dreistufigen Biomasse-Transport, der nicht nur der externen Aufbereitung und Lagerung der Biomasse geschuldet ist, sondern auch den unterschiedlichen Sammelweisen der städtischen Biomasse Rechnung trägt (lose Sammlungen, Laubsäcke).

Im ländlich-städtischen Szenario ist Vattenfall als Betreiber der HTC-Anlage am Standort des Kohleheizkraft-

Abbildung 1

Treibhausgasvermeidungspotentiale und -kosten der drei HTC-Szenarien



Quelle: Eigene Berechnungen.

© DIW Berlin 2017

Mitverbrennung im bestehenden Kohlekraftwerk senkt Kosten im ländlich-städtischen und ländlichen Szenario.

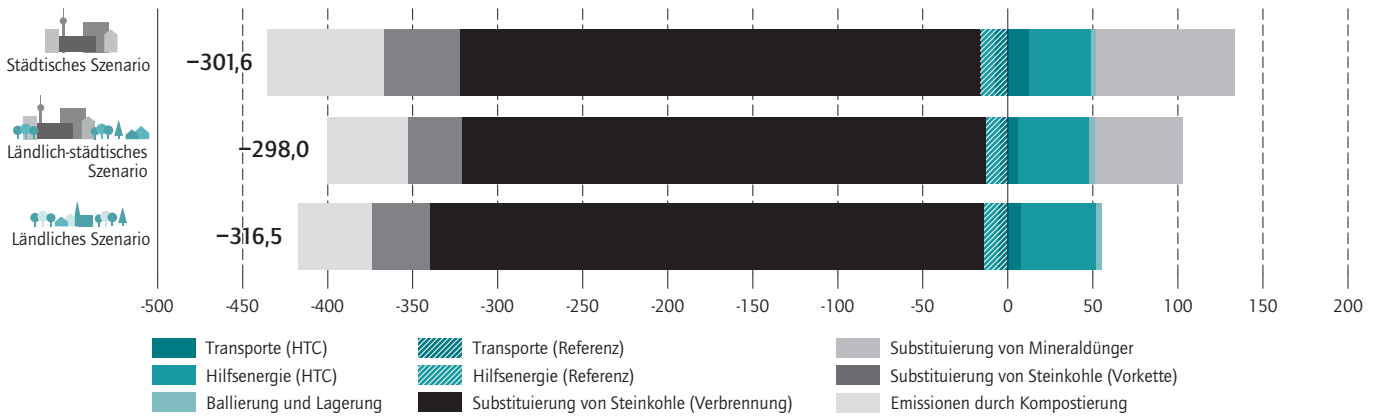
werks Reuter West vorgesehen. Dort wird die HTC-Kohle zur Substituierung von Steinkohle mitverbrannt. Die Aufbereitung und Lagerung der Biomasse erfolgt an verschiedenen Standorten außerhalb Berlins. Da nicht zwischen losen Sammlungen und Laubsäcken unterschieden wird, ist allerdings nur ein zweistufiges logistisches Konzept für den Biomasse-Transport vorgesehen.

Im ländlichen Szenario wird die HTC-Anlage schließlich von einer Kompostierungsanlage in Jühnsdorf, Brandenburg, betrieben. Nach ihrer Herstellung gelangt die HTC-Kohle zur Mitverbrennung ins Kohleheizkraftwerk Reuter West. Aufbereitung und Lagerung der Biomasse erfolgen an zwei Orten in Brandenburg. Das logistische Konzept umfasst zwei Stufen für den Transport der Bio-

Abbildung 2

**Netto-Einsparungen an Treibhausgasen**

Lebenszyklus-Emissionen der HTC-Szenarien abzüglich der Referenz-Emissionen, in Kilogramm CO<sub>2</sub>e pro Tonne Frischmasse



Anmerkung: Die Szenarien basieren auf unterschiedlichen jährlichen Biomasse-Inputs (siehe Tabelle).

Quelle: Eigene Berechnungen.

Der Großteil der CO<sub>2</sub>e-Reduktion kommt durch die Substituierung der Steinkohle zustande.

masse und eine weitere Stufe für den Transport der HTC-Kohle.

Allen Szenarien ist gemein, dass die HTC-Kohle Steinkohle zur Erzeugung von Strom und Wärme im Kohleheizkraftwerk Reuter West ersetzt. Zur Vergleichbarkeit der Szenarien gilt dies insbesondere auch im städtischen Szenario, obwohl die HTC-Kohle dort nicht unmittelbar im Kohleheizkraftwerk Reuter West, sondern in einem Biomasse-Blockheizkraftwerk verbrannt wird. Da ein Großteil der Grünabfälle im Großraum Berlin kompostiert wird,<sup>12</sup> besteht die Referenznutzung der Biomasse in allen Szenarien aus der Kompostierung der Grünabfälle und ihrer anschließenden Bodeneinarbeitung zur Substituierung von Mineraldünger.

**Positives Treibhausgasvermeidungspotential von HTC-Kohle**

Entzieht man die in den drei Szenarien betrachteten Grünabfälle der Kompostierung und nutzt sie stattdessen zur Herstellung von HTC-Kohle, die Steinkohle in der Energiegewinnung ersetzt, kann ein positiver Beitrag zur Treibhausgasvermeidung geleistet werden. Konkret

spart man mit der HTC-Kohle im städtischen Szenario netto 301,6 Kilogramm CO<sub>2</sub>e<sup>13</sup> pro Tonne Frischmasse (Abbildung 1). Im ländlich-städtischen Szenario sind es 298,0 Kilogramm CO<sub>2</sub>e pro Tonne Frischmasse und im ländlichen Szenario 316,5 Kilogramm CO<sub>2</sub>e pro Tonne Frischmasse. Der Großteil der Treibhausgasreduktionen kommt dabei durch die Substituierung von Steinkohle zustande (Abbildung 2). Der Wegfall der Kompostierung, die trotz der Ersetzung von Mineraldünger inklusive aller Transporte und Hilfsenergie mit Netto-Emissionen verbunden ist, leistet ebenfalls einen positiven, wenn auch geringen Beitrag. Emissionsquellen sind dagegen die mit der Herstellung von HTC-Kohle verbundenen Transporte, die Ballierung und Lagerung der Biomasse sowie sonstige Hilfsenergie.

Basierend auf den in der Tabelle genannten Mengen an Biomasse, die jährlich in HTC-Kohle umgewandelt werden könnten, beläuft sich das Treibhausgasvermeidungspotential des städtischen Szenarios auf 22 230 Tonnen CO<sub>2</sub>e pro Jahr. Im ländlich-städtischen Szenario könnten jährlich 22 532 Tonnen CO<sub>2</sub>e vermieden werden. Im ländlichen Szenario sind es jährlich 25 749 Tonnen CO<sub>2</sub>e. Über alle Szenarien hinweg beträgt das aggregierte Treibhausgasvermeidungspotential von HTC-Kohle im Großraum Berlin somit 70 511 Tonnen CO<sub>2</sub>e pro Jahr. Dies

<sup>12</sup> Thomas Schwillung et al. (2011): Abfallwirtschaftskonzept für das Land Berlin (nach Zustimmung des Abgeordnetenhauses vom 12. Mai 2011): Planungszeitraum 2010 bis 2020. Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz, Berlin (online verfügbar).

<sup>13</sup> Um die Treibhauspotentiale unterschiedlicher Treibhausgase vergleichbar zu machen, werden sie in Kohlenstoffdioxidäquivalente umgerechnet.

entspricht ungefähr 1,6 Prozent der Treibhausgaseinsparungen in Höhe von 4,3 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>e pro Jahr, die notwendig sind, um die Treibhausgasemissionen Berlins von ihrem Niveau des Jahres 2005 (ungefähr 21,9 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>e) auf das für das Jahr 2020 angestrebte Ziel von jährlich 17,6 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>e zu senken.<sup>14</sup>

Das aggregierte Treibhausgasvermeidungspotential von HTC-Kohle ist vergleichbar mit den Emissionsreduktionen in Höhe von jährlich 67 874 Tonnen CO<sub>2</sub>e, die in Berlin durch Energiesparpartnerschaften zur Steigerung der Energieeffizienz in öffentlichen Gebäuden erreicht wurden.<sup>15</sup> Es ist jedoch deutlich geringer als viele andere Maßnahmen zur Treibhausgasvermeidung. So wird zum Beispiel dem Austausch von herkömmlichen Heizkesselanlagen durch dezentrale Blockheizkraftwerke ein Treibhausgasvermeidungspotential in Höhe von bis zu 280 000 Tonnen CO<sub>2</sub>e pro Jahr zugerechnet.<sup>16</sup> Noch größere Einsparpotentiale könnten durch die energetische Sanierung von privaten Gebäuden realisiert werden.<sup>17</sup>

### HTC-Kohle ist aktuell nicht konkurrenzfähig, ihre Treibhausgasvermeidungskosten ähneln jedoch teilweise den Schadenskosten des Klimawandels

Zur ökonomischen Bewertung von Maßnahmen zur Treibhausgasvermeidung wie der HTC-Kohle eignen sich die so genannten Treibhausgasvermeidungskosten. Sie geben an, wie teuer es ist, mit Hilfe des Einsatzes von HTC-Kohle eine Tonne CO<sub>2</sub>e einzusparen. Zu ihrer Berechnung werden zunächst von den Kosten eines HTC-Szenarios die Kosten des entsprechenden Referenzszenarios abgezogen. Die entstandene Kostendifferenz (in Euro pro Jahr) wird anschließend durch die Emissionen (in Tonnen CO<sub>2</sub>e pro Jahr) geteilt, die durch die Abkehr vom Referenzszenario zum HTC-Szenario eingespart werden.

Nach den vorliegenden Berechnungen ist die Realisierung der Treibhausgasvermeidungspotentiale in den drei Szenarien mit unterschiedlichen Treibhausgasvermeidungskosten verbunden. So fallen im städtischen Szenario pro vermiedener Tonne CO<sub>2</sub>e Kosten von 163 Euro an (Abbildung 1). Im ländlich-städtischen Szenario und im ländlichen Szenario belaufen sie sich dagegen nur auf 74 Euro beziehungsweise 75 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>e.

<sup>14</sup> André Suck et al. (2011): Energiekonzept 2020. Erstellt für Senatsverwaltung für Wirtschaft, Technologie und Frauen, Berlin (online verfügbar).

<sup>15</sup> Suck et al. (2011), a. a. O.

<sup>16</sup> Suck et al. (2011), a. a. O.

<sup>17</sup> Suck et al. (2011), a. a. O.

Sowohl das ländlich-städtische Szenario als auch das ländliche Szenario wären somit ab einem angenommenen Preis von knapp über 75 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>e wirtschaftlich durchführbar. Es zeigt sich damit einerseits, dass HTC-Kohle zu CO<sub>2</sub>-Preisen von ungefähr 5 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>, wie sie durchschnittlich im Jahr 2016 im Emissionshandelssystem der Europäischen Union (EU ETS) gegolten haben, nicht mit fossiler Kohle konkurrieren kann.<sup>18</sup> Andererseits reflektieren die aktuellen CO<sub>2</sub>-Preise nicht die zu erwartenden Schäden durch den unverminderten Treibhausgasausstoß. Um diese Schadenskosten des Klimawandels zu berücksichtigen, werden in einer Studie von Wolfram Krewitt und Barbara Schlomann 70 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> als bester Schätzwert vorgeschlagen.<sup>19</sup> Das Umweltbundesamt empfiehlt, 80 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> anzusetzen.<sup>20</sup> Obwohl die den ermittelten Werten zugrunde liegenden Schätzungen stark streuen und jegliche Bezifferung von Schadenskosten unter großem Vorbehalt steht, da viele unbekannte Variablen im Spiel sind,<sup>21</sup> bewegen sich die Treibhausgasvermeidungskosten beider Szenarien zumindest im Bereich der hier genannten Schadenskosten.

Eine Zerlegung der Treibhausgasvermeidungskosten in ihre Kostenbestandteile (Abbildung 3) zeigt, dass das ländlich-städtische Szenario und das ländliche Szenario vor allem deshalb geringere Treibhausgasvermeidungskosten als das städtische Szenario aufweisen, da sie von einer Mitverbrennung der HTC-Kohle in einem bestehenden Kohleheizkraftwerk ausgehen. Im städtischen Szenario wird dagegen angenommen, dass die HTC-Kohle in einem neu errichteten Biomasse-Blockheizkraft-

<sup>18</sup> Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen zum Beispiel die folgenden Studien: Gerd Eberhardt et al. (2011): Rentabilität der Hydrothermalen Karbonisierung unter besonderer Berücksichtigung von Transportkosten. *Berichte über Landwirtschaft* 89 (3), 400-424; Berit Erlach, Benjamin Wirth und George Tsatsaronis (2011): Co-production of electricity, heat and bio coal pellets from biomass: A techno-economic comparison with wood pelletizing. *Proceedings of the World Renewable Energy Congress 2011, Linköping, Sweden, May 8-13, 2011*, 508-515; Jan Stemann, Berit Erlach und Felix Ziegler (2013): Hydrothermal carbonisation of empty palm oil fruit bunches: Laboratory trials, plant simulation carbon avoidance, and economic feasibility. *Waste and Biomass Valorization* 4 (3), 441-454.

<sup>19</sup> Wolfram Krewitt und Barbara Schlomann (2006): Externe Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Vergleich zur Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern. Gutachten im Rahmen von Beratungsleistungen für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI).

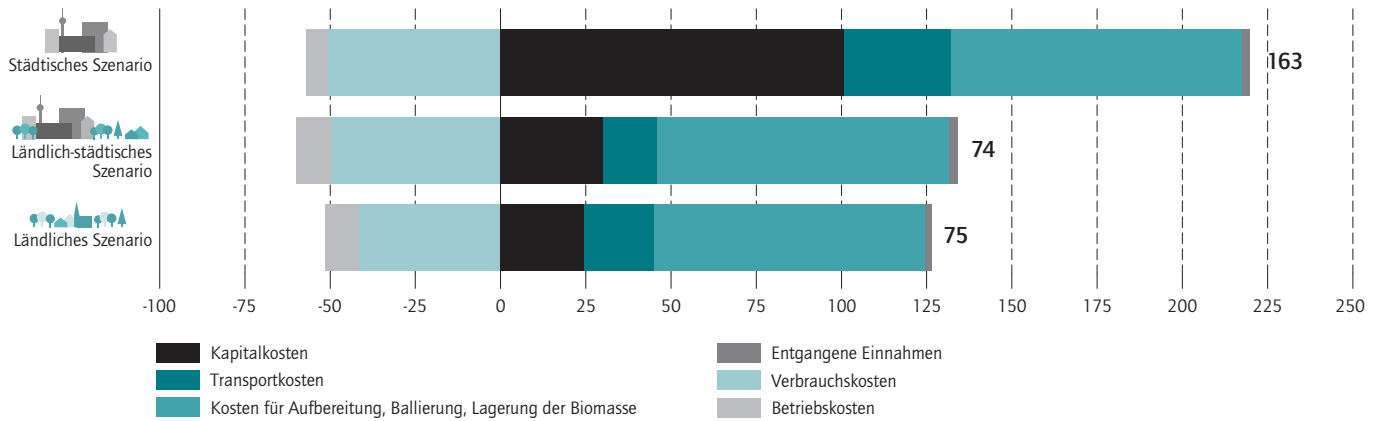
<sup>20</sup> Umweltbundesamt (Hrsg.) (2014, aktualisiert): Schätzung der Umweltkosten in den Bereichen Energie und Verkehr: Empfehlungen des Umweltbundesamtes. Die Angaben des Umweltbundesamtes beziehen sich auf die Kaufkraft des Jahres 2010.

<sup>21</sup> Krewitt und Schlomann (2006), a. a. O.; Umweltbundesamt (2014, aktualisiert), a. a. O.; Jeroen C. J. M. van den Bergh und W. J. Wouter Botzen (2014): A lower bound to the social cost of CO<sub>2</sub> emissions. *Nature Climate Change* 4, 253-258.

Abbildung 3

**Bestandteile der Treibhausgasvermeidungskosten**

In Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>e



Anmerkung: Die Angaben für jede Kostenkategorie beziehen sich auf die Kosten der HTC-Szenarien abzüglich der Referenz-Kosten, dividiert durch die jährliche Einsparung an Emissionen.

Quelle: Eigene Berechnungen.

© DIW Berlin 2017

Höhere Kapital- und Transportkosten schlagen im städtischen Szenario zu Buche.

werk verbrannt wird, welches die Kapitalkosten erhöht.<sup>22</sup> Dem städtischen Szenario liegt außerdem ein komplexeres Logistikkonzept zugrunde, welches die Transportkosten relativ zum ländlich-städtischen und ländlichen Szenario erhöht. In allen drei Szenarien verursachen die Aufbereitung und die Lagerung der Biomasse erhebliche Kosten. Da HTC-Kohle darüber hinaus mit geringeren Verbrauchs- und Betriebskosten verbunden ist als das Referenzszenario (Steinkohleverbrennung sowie Kompostierung und Bodeneinarbeitung), werden diese als Kosteneinsparungen dargestellt. Entgangene Einnahmen, hauptsächlich aus dem Verkauf von Kompost, fallen kaum ins Gewicht.

Die Literatur hat mit unseren Ergebnissen vergleichbare Treibhausgasvermeidungskosten für HTC-Kohle errechnet. Insbesondere die Kosten des ländlich-städtischen und ländlichen Szenarios ähneln denen für HTC-Kohle aus Bioabfällen in Höhe von 81,28 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>e.<sup>23</sup> Die Kosten des städtischen Szenarios liegen dagegen etwas oberhalb derjenigen für HTC-Kohle aus Pappel-Holzhackschnitzeln, die sich im Bereich von

115,75 bis 135,14 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>e bewegen.<sup>24</sup> Darüber hinaus sind die Treibhausgasvermeidungskosten in allen drei Szenarien geringer als diejenigen, die bei der Biogasherstellung aus Bioabfällen (190 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>e)<sup>25</sup> beziehungsweise aus Mais und Mais-Rindergülle-Mixturen in Brandenburg (288 bis 674 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>e) anfallen.<sup>26</sup>

**Fazit: HTC-Kohle kann die Ausstiegsphase aus fossiler Kohle klimafreundlicher gestalten**

Aus dem Vergleich der drei Szenarien lässt sich schließen, dass der Standort der HTC-Anlage sowie das zugrunde liegende logistische Konzept für die Rentabilität der HTC-Kohle von Bedeutung sind. Kostenvorteile durch die Errichtung einer HTC-Anlage am Ort der HTC-Kohle-Verbrennung müssen zum Beispiel gegen einen erhöhten Transportbedarf und eingeschränkte Lagerkapazitäten für die Biomasse abgewogen werden. Vor allem ist aber die Nutzung eines existierenden

22 Bei einer alternativen Mitverbrennung der HTC-Kohle im Kohleheizkraftwerk Reuter West würden die Treibhausgasvermeidungskosten im städtischen Szenario ein ähnliches Niveau aufweisen wie in den beiden anderen Szenarien.

23 Erlach, Wirth, Tsatsaronis (2011), a. a. O. Die Angaben beziehen sich auf 2009.

24 Erlach, Wirth, Tsatsaronis (2011), a. a. O. Die Angaben beziehen sich auf 2009.

25 Christiane Hennig und Marek Gawor (2012): Bioenergy production and use: Comparative analysis of the economic and environmental effects. Energy Conversion and Management 63, 130-137.

26 Lukas Scholz, Andreas Meyer-Aurich und Dieter Kirschke (2011): Greenhouse gas mitigation potential and mitigation costs of biogas production in Brandenburg, Germany. AgBioForum 14 (3), 133-141.



tierenden Kohleheizkraftwerks zur Mitverbrennung der HTC-Kohle preiswerter als die Errichtung eines neuen Biomasse-Blockheizkraftwerks zu deren Einzelverbrennung. Dies zeigt, dass HTC-Kohle insbesondere als eine Möglichkeit infrage kommt, den Treibhausgasausstoß bestehender Kohlekraftwerke zu senken und damit die Ausstiegsphase aus fossiler Kohle klimafreundlicher zu gestalten.

Zu aktuellen CO<sub>2</sub>-Preisen rechnet sich dies jedoch nicht. Im Hinblick auf den positiven Beitrag der HTC-Kohle zur Treibhausgasvermeidung und die Treibhausgasvermeidungskosten, die zumindest teilweise den empfohlenen

Kostensätzen zur Internalisierung von Klimafolgeschäden entsprechen, wäre die Möglichkeit einer politischen Förderung der HTC-Kohle jedoch näher zu untersuchen. Zum einen kommen hierbei erhöhte CO<sub>2</sub>-Preise in Betracht, welche die Schadenskosten bei unverminderten Treibhausgasemissionen besser abbilden. Dies könnte zum Beispiel durch höhere Preise für Emissionszertifikate im EU-Emissionshandel erreicht werden oder durch die aktuell diskutierten Mindestpreise für Treibhausgasemissionen. Zum anderen könnte die Einzel- oder Mitverbrennung von HTC-Kohle auch direkt gefördert werden, beispielsweise im Rahmen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes.

**Jakob Medick** war Studentische Hilfskraft am DIW Berlin. Die Studie basiert auf seiner Masterarbeit | [medick@dw-eco.com](mailto:medick@dw-eco.com)

**Isabel Teichmann** ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt am DIW Berlin | [iteichmann@diw.de](mailto:iteichmann@diw.de)

**Claudia Kemfert** ist Leiterin der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt am DIW Berlin | [ckemfert@diw.de](mailto:ckemfert@diw.de)

JEL: Q42, Q51, Q54

**Keywords:** Hydrothermal carbonization, HTC coal, climate change, renewable energy, biomass, waste management, life cycle



DIW Berlin – Deutsches Institut  
für Wirtschaftsforschung e. V.  
Mohrenstraße 58, 10117 Berlin  
T +49 30 897 89 -0  
F +49 30 897 89 -200  
84. Jahrgang

#### Herausgeberinnen und Herausgeber

Prof. Dr. Tomaso Duso  
Dr. Ferdinand Fichtner  
Prof. Marcel Fratzscher, Ph.D.  
Prof. Dr. Peter Haan  
Prof. Dr. Claudia Kemfert  
Prof. Dr. Lukas Menkhoff  
Prof. Johanna Mollerstrom, Ph.D.  
Prof. Karsten Neuhoff, Ph.D.  
Prof. Dr. Jürgen Schupp  
Prof. Dr. C. Katharina Spieß  
Prof. Dr. Gert G. Wagner

#### Chefredaktion

Dr. Gritje Hartmann  
Dr. Wolf-Peter Schill

#### Redaktion

Renate Bogdanovic  
Dr. Franziska Bremus  
Claudia Cohnen-Beck  
Prof. Dr. Christian Dreger  
Dr. Daniel Kemptner  
Sebastian Kollmann  
Markus Reiniger  
Mathilde Richter  
Dr. Alexander Zerrahn

#### Lektorat

Dr. Christian von Hirschhausen  
Dr. Jörn Richstein

#### Vertrieb

DIW Berlin Leserservice  
Postfach 74  
77649 Offenburg  
leserservice@diw.de  
Tel. (01806) 14 00 50 25  
20 Cent pro Anruf  
ISSN 0012-1304  
ISSN 1860-8787 (Online)

#### Gestaltung

Edenspiekermann

#### Satz

Satz-Rechen-Zentrum, Berlin

#### Druck

USE gGmbH, Berlin

Nachdruck und sonstige Verbreitung –  
auch auszugsweise – nur mit Quellen-  
angabe und unter Zusendung eines  
Belegexemplars an die Serviceabteilung  
Kommunikation des DIW Berlin  
(kundenservice@diw.de) zulässig.

Gedruckt auf 100 % Recyclingpapier.