



Messung der Umweltauswirkungen von Energie
aus Holzpellets: eine Enviva-Fallstudie
Juli 2020

Über Boundless Impact Investing

Boundless ist ein Unternehmen, das auf Marktforschung und Wirkungsanalysen spezialisiert ist und quantitative und evidenzbasierte Untersuchungen und Daten für Investoren, Unternehmen und Fonds bereitstellt. Basierend auf den neuesten Erkenntnissen unabhängiger Experten aus Industrie und Wissenschaft bietet Boundless Impact Investing Analysen, Markttrends und Beweise für bewährte Verfahren in einer wachsenden Zahl aufstrebender Sektoren, die sich mit wichtigen Umwelt- und Gesundheitsproblemen befassen. Unsere Forschung im Bereich aufstrebender Technologien, Folgenabschätzung von Unternehmen und Vordenkern liefert Anlegern die neuesten und relevantesten Informationen für ihre Investitionsentscheidungen. Mehr über Boundless Impact Investing finden Sie unter <https://boundlessimpact.net>.

Die Informationen aus diesem Bericht von Boundless Impact Investing sind nur zur unverbindlichen Kenntnisnahme. Die Informationen in diesem Bericht sollten weder als Rechts- oder Finanzberatung noch als Angebot zum Kauf oder Verkauf oder als Aufforderung zur Abgabe eines Angebots zum Kauf oder Verkauf von Wertpapieren, Produkten, Dienstleistungen oder Investitionen angesehen werden. Boundless Impact Investing gibt keine Garantie oder andere Versprechungen, Zusicherungen oder Gewährleistungen hinsichtlich der Richtigkeit oder Vollständigkeit der darin enthaltenen Tatsachenbehauptungen oder der Ergebnisse, die durch die Nutzung unserer Inhalte erzielt werden können. Weder dieser Inhalt noch die genannten Investitionsbeispiele sollten für Investitionsentscheidungen verwendet werden, bevor nicht der eigene Finanzberater konsultiert und eigene Untersuchungen und Due-Diligence-Prüfungen durchgeführt wurden. Boundless Impact Investing erhält keine Zahlungen, Vergütungen oder Provisionen für die Nutzung oder Nennung von Investitionsbeispielen in dem vorliegenden Inhalt. Boundless Impact Investing lehnt im größtmöglichen, gesetzlich zulässigen Umfang jegliche Haftung für den Fall ab, dass sich Informationen, Kommentare, Analysen, Meinungen, Ratschläge und/oder Empfehlungen als ungenau, unvollständig oder unzuverlässig erweisen oder zu Anlage- oder anderen Verlusten führen.

Inhaltsverzeichnis

Über Boundless Impact Investing	2
Zusammenfassung	4
Hintergrund	5
Erläuterung der Messung der Klimaauswirkungen anhand der Ökobilanz	6
Angleichung der Holzpellet-Biomasse an die Ziele für nachhaltige Entwicklung.....	7
Argumente für eine nachhaltige Forstbewirtschaftung.....	8
Envivas Umweltprofil	11
Auswirkungsprofil THG-Zusammenfassung für die Stromproduktion auf Basis von Holzpellets im Vereinigten Königreich.....	12
Marktanalyse - Strom aus Holzpellets senkt die Emissionen des Energiesektors.....	16
Auswirkungen auf den Strommarkt des Vereinigten Königreichs	16
Auswirkungen auf den Strommarkt Deutschlands	17
Auswirkungen auf den Strommarkt Japans	18
Schlussfolgerung	20
Anlage: Erörterung von Kohlenstoffneutralität und Ökobilanzpraktiken	22
Fußnoten	28

Zusammenfassung

Da sich die Strom- und Wärmeversorgungsunternehmen zunehmend von fossilen Brennstoffen abwenden, um den internationalen Verpflichtungen zur Emissionsreduzierung nachzukommen, haben alle Quellen erneuerbarer Energien ein beträchtliches Wachstum erfahren. Während Solaranlagen und Windräder häufig die ersten Technologien sind, an die man denkt, schätzt die Internationale Energieagentur IEA, dass Bioenergie in den nächsten fünf Jahren den größten Anteil erneuerbarer Energien ausmachen und für mehr als 30 % des Wachstums verantwortlich sein wird. Insbesondere wird erwartet, dass die Biomasse auf Holzpelletbasis bis 2025 eine Wachstumsrate von 9,2 % verzeichnen und einen Markt in Höhe von 15,47 Mrd. US\$ erreichen wird. Dieses Wachstum ist zu einem großen Teil auf die attraktive Alternative zurückzuführen, Kohlekraftwerke auf Holzpellets umzustellen. Die Umstellung eines bestehenden Kohlekraftwerks ist preiswerter als der Bau neuer Kraftwerke, liefert kontinuierlich Strom zur Sicherung der Netzstabilität und vermeidet die Standortprobleme, die dezentralisierte erneuerbare Energieprojekte beeinträchtigen können. Gleichzeitig haben Veröffentlichungen von Forschungsergebnissen und Artikel in der Tagespresse die Vorteile von Bio-Strom aus Holz im Verhältnis zu Kohle in Bezug auf Treibhausgase in Frage gestellt. Die Stromproduktion aus Biomasse kann umstritten sein, wobei die Umweltbilanz in erster Linie von der Forstbewirtschaftung und der Holzbeschaffungspraxis abhängt. Die sich daraus ergebende Verwechslung kann Entscheidungsträger verwirren, die durchdachte, akzeptable und effektive Energiestrategien entwickeln wollen, um Treibhausgasemissionen zu senken.

Dieser Bericht ist ein Versuch, die zunehmend wichtige Rolle nachhaltig produzierter Holzpellets bei der dringend erforderlichen Kohlendioxidreduzierung darzustellen. Enviva ist der weltweit größte Hersteller von Holzpellets und bietet Kraftwerken einen Brennstoff als Ersatz für Kohle sowie die Möglichkeit ununterbrochener Strom- und Wärmeerzeugung bei gleichzeitiger Reduzierung der Treibhausgasemissionen. Enviva hat Boundless Impact Investing (Boundless) mit der Durchführung einer objektiven Umweltbewertung der Stromerzeugung im Vereinigten Königreich auf Basis von Biomasse aus Holzpellets beauftragt. Boundless hat die Auswirkungen mittels der Ökobilanz-Praktiken (LCA - Life Cycle Assessment) gemessen. Die Untersuchung verfolgt folgende Ziele:

- Begründung der Anforderungen, um Geschäftsmethoden als „nachhaltig“ einzustufen;
- Quantifizierung der Kohlenstoffintensität und weiterer Umweltauswirkungen für Strom aus Holzpellets im Verhältnis zu alternativen Energieerzeugungstechniken; und
- Evaluierung der Marktauswirkungen, wenn Strom aus Holzpellets in Kraftwerken eingeführt wird und so die Abhängigkeit des Netzes von fossilen Brennstoffen reduziert.

Im Hinblick auf das erste Ziel enthält der vorliegende Bericht eine nuancierte Erörterung der Praktiken, die zu nachhaltiger Waldbewirtschaftung beitragen und umfasst Bemühungen, sicherzustellen, dass nachhaltige Praktiken für den Brennstoffmarkt im Südosten der USA und europäische Energiemärkte dauerhaft erreicht werden. Die Umweltauswirkungen der Biomasse-Produktion ist zweifelsohne von fallspezifischen Praktiken abhängig und diese Studie schlussfolgert, dass schlecht konzipierte Systeme sich negativ auf Ökosysteme und Klimaziele auswirken könnten. Im Gegensatz dazu können gut konzipierte Versorgungsketten nicht nur zu vorteilhafter Emissionsreduzierung führen, sondern durch sorgfältige Forstwirtschaft auch zur Aufrechterhaltung ökologischer Funktionen des Waldes beitragen.

Aus unserer Studie geht einerseits hervor, dass Enviva (das keinen Wald besitzt) in vollem Umfang durch das Sustainable Biomass Program (SBP), ein Zertifizierungsprogramm für die Lieferkette holzartiger Rohstoffe, zertifiziert ist. Jedoch stammen nur 23 % des von Enviva für die Pelletproduktion bezogenen Holzes aus Wäldern, die 2018 nach den strengeren Zertifizierungsprogrammen SFI, FSC oder ATFS zertifiziert waren. Die letztgenannten Programme zertifizieren Waldflächen nach strikten Zertifizierungsstandards vor Ort. 8 % bis 25 % der Waldflächen in den Staaten, in denen Enviva tätig ist, sind insgesamt zertifiziert. Die Waldbestände im Südosten der Vereinigten Staaten sind beständig gewachsen, während die Umweltqualität aufgrund zunehmend effizienter Verordnungen,

Landnutzungspraktiken und Zertifizierungsprozesse Dritter verwaltet und überwacht wird.

Ferner hat unsere Untersuchung sich mit der Kontroverse um die „Klimaneutralität“ befasst. In dieser Fallstudie besteht der Brennstoff auf Basis von Holzpellets aus biogenem Kohlenstoff aus Wirtschaftswäldern, die permanent Kohlenstoff aus der Atmosphäre in Bäume aufnehmen und wieder in die Atmosphäre abgeben. Im Gegensatz dazu sind herkömmliche fossile Brennstoffe in erster Linie eine „Einbahnstraße“ von dem geologischen Kohlenstoffspeicher in die Atmosphäre. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass Strom aus Holzpellets im Vergleich zu Kohlestrom unter den untersuchten Gegebenheiten in Bezug auf die THG-Emissionen vorteilhaft ist. Aus diesen Gründen stellt Boundless fest, dass die Umweltauswirkungen von Strom aus Holzpellets verlässlich nur durch eine Untersuchung spezifischer Fallstudien verstanden werden können.

Für das zweite Ziel wurde eine Fallstudie der Holzpellet-Produktion mit Rohstoffen aus dem Südosten der Vereinigten Staaten zur Versorgung der Kraftwerke im Vereinigten Königreich durchgeführt. Diese Untersuchung hat gezeigt, dass gut konzipierte Biomasse-Elektrizitätsnetze auf Holzpelletbasis zu wesentlich geringeren THG-Emissionen führen können als herkömmliche Erdgas- und Kohlekraftwerke. Kohlenstoffintensität und weitere Umweltkennzahlen wurden entwickelt, um Strom aus Holzpellets im Vereinigten Königreich mit Stromerzeugungsquellen wie Kohle, Erdgas, Solarenergie und Windenergie zu vergleichen. Die THG-Emissionen im Lebenszyklus von Biomasse auf Basis von Holzpellets lagen über denen für Wind- und Solarenergie, jedoch jeweils weit unter den Emissionswerten für Kohle und Erdgas. Ersetzt man Kohlestrom 1:1, erreicht man mit Holzpellets 87 % Emissionsreduzierung, mit Solarstrom 92 % und mit Windenergie 97 %.

Abschließend wurden die Marktauswirkungen evaluiert, wenn Strom aus Holzpellets in Kraftwerken eingeführt wird und so die Abhängigkeit des Netzes von fossilen Brennstoffen und die damit verbundenen THG-Emissionen reduziert werden. Bei einer Modellierung des Energiesektors wurde der Einsatz von Brennstoff aus Holzpellets auf das Vereinigte Königreich, Deutschland und Japan ausgedehnt. Im Rahmen der Bemühungen der einzelnen Länder, den Beitrag erneuerbarer Energien und der Atomenergie im Verhältnis zu den jeweiligen Emissionszielen zu erhöhen, wurden Szenarien mit unterschiedlichen Strombeiträgen aus Holzpellets modelliert. In jedem Fall ergab sich, dass Holzpellets als Bestandteil unterschiedlicher Energieerzeugungsportfolios, in deren Rahmen auch die Versorgung aus anderen erneuerbaren Energien und von Atomstrom erweitert wird, in bedeutendem Umfang zu einer erheblichen Reduzierung der THG-Emissionen beitragen. Die Beschaffenheit umfassender, vielschichtiger Energieversorgungsnetze macht alle vorgenannten Ansätze zur Minderung der THG-Emissionen attraktiv, da sie die einzigartigen Eigenschaften jeder kohlenstoffarmen Technologie nutzen. Beispielsweise kann die Biomasseerzeugung dynamisch reagieren, um die schwankende Stromversorgung anderer, intermittierender erneuerbarer Ressourcen auszugleichen und trägt so dazu bei, dass Systembetreiber Versorgungsunterbrechungen vermeiden können. Während Strom aus Erdgas häufig einen hervorragenden Ausgleich bietet, sind die dazugehörigen THG-Emissionen erheblich. Zusammenfassend bietet Strom aus Holzpellets einen außergewöhnlichen strategischen Wert bei den Bemühungen um die Kohlenstoffreduzierung in den bewerteten Ländern, wenn nachhaltig konzipierte, auf Holz basierende Biokraftstoff-Lieferketten geringe Kohlenstoffintensität aufweisen. Aber es sollte nicht davon *ausgegangen* werden, dass Holz-Biokraftstoff im Sinne eines ganzheitlichen Lebenszyklus treibhausgasneutral ist, ohne fallspezifisch alle Einträge, Herkünfte und Leistungsverbraucher einschließlich Probleme in Verbindung mit Änderungen der Landnutzung betrachtet zu haben, die nachstehend detailliert erörtert werden.

Hintergrund

Nachdem das Wirtschaftswachstum in den USA, Kanada, Westeuropa, Australien und Neuseeland aufgrund von Erdölmangel und eskalierenden Erdölpreisen in den 70er Jahren zu stagnieren begann, sind allmählich alternative Energiequellen, beispielsweise Biomasse auf Pflanzenbasis als Lösung der Krise aufgekommen. Seither verzeichnen kommerzielle Bioenergie-Initiativen und Biomasse-Initiativen

auf Basis von Holzpellets einen Aufschwung. De facto erwartet die Internationale Energieagentur IEA nicht nur, dass Bioenergie in den nächsten fünf Jahren die größte Wachstumsquelle erneuerbarer Produktion sein wird, sondern auch mehr als 30 % dieses Wachstums ausmachen wird.¹ Insbesondere wird erwartet, dass der Einsatz von Biomasse auf Holzpelletbasis bis 2025 eine Wachstumsrate von 9,2 % verzeichnen und 15,47 Mrd. US \$ erwirtschaften wird.² Heute sind Holz und Holzrückstände die wichtigste Quelle für Energie aus Biomasse.

Simplifiziert enthält Biomasse aus der Sonne gespeicherte Energie. Biomasse kann durch thermische Umwandlung verbrannt und in Form von Wärme oder Stromproduktion als Energie verwendet werden. Neue Regulierungen und Subventionen, die Kohlenstoffpreisgestaltung in Europa, die Erschöpfung fossiler Brennstoffvorkommen und Diskussionen über den CO₂-induzierten Klimawandel haben den Biomasse-Markt erweitert und das Wachstum der Energieerzeugung aus Biomasse auf der Basis von Holzpellets zur Nutzung in Europa und Asien mit einbezogen. Zusätzlich zu ihrem niedrigen Kohlenstoffgehalt bieten diese Brennstoffe attraktive Vorteile für die Netzbetreiber. Der Grund ist, dass stoßweise vorhandene Wind- und Solarenergieressourcen eine Belastung für die Stromnetze darstellen, die Energie aus Biomasse jedoch „abrufbar“ ist und eine flexible und zuverlässige Form erneuerbaren Stroms darstellt, um Angebot und Nachfrage auszugleichen. Holzpellets stellen für Energieerzeuger auch dadurch eine wirtschaftlich attraktive Option dar, dass bestehende Kohlekraftwerke verhältnismäßig leicht und kosteneffizient nachgerüstet werden können, um diesen Brennstoff zu nutzen und gleichzeitig strittige öffentliche Auseinandersetzungen um den Standort neuer Infrastrukturen vermieden werden.

Um diese wachsenden Biomassemärkte zu unterstützen, ist nachhaltiges Ökosystemmanagement für den Betrieb der Bioenergie-Lieferkette von zentraler Bedeutung. Nachhaltig bewirtschaftete Wälder bieten ein Potenzial für die kontinuierliche Versorgung mit Holzprodukten und eine zuverlässige Form kohlenstoffarmen Brennstoffs. Schlecht bewirtschaftete Wälder zerstören nicht nur die Umwelt, sondern Schaden den Bemühungen um den Klimaschutz, denn mit abnehmenden Waldflächen und Holzvolumina nimmt auch der Kohlenstoffspeicher ab.

Als weltweit größtem Erzeuger von Holzpellets stellt die nachhaltige Bewirtschaftung eine grundlegende Motivation für den Geschäftsbetrieb von Enviva dar.³ Enviva ist Eigentümer und Betreiber von acht Werken (*Stand Juli 2020; seit August 2020 neun Werke*) im Südosten der Vereinigten Staaten. Diese erzeugen jährlich knapp 4 Millionen metrische Tonnen Holzpellets, die weltweit, auch im Vereinigten Königreich, Japan, Dänemark und in den Niederlanden vertrieben werden.⁴ Der Holzpellet-Brennstoff von Enviva bietet Energieversorgungsunternehmen die Möglichkeit intermittierender Strom- und Wärmeerzeugung, wobei die Treibhausgasemissionen auf Basis eines Lebenszyklus dank geringerer Nutzung von Kohle, Erdgas und Erdöl im gesamten Netz gemindert werden.

Erläuterung der Messung der Klimaauswirkungen anhand der Ökobilanz

Aufgrund des komplexen und flächenintensiven Charakters der land- und forstwirtschaftlichen Industrie sind die Bedenken über ihre Umweltauswirkungen gerechtfertigt. Daher ist die Ökobilanz (Life Cycle Analysis - LCA) maßgeblich. Die Ökobilanz hat sich aus Energiestudien in den 60er und 70er Jahren des letzten Jahrhunderts entwickelt und ist für Ingenieurbüros, Entscheidungsträger, Forscher und die Industrie zu einem wichtigen Instrument der Entscheidungsfindung geworden. Die Ökobilanz bedient sich standardisierter Methoden, um ein Verständnis der Umweltauswirkungen auf Systemebene darzustellen. Ökobilanzen werden in Anspruch genommen, um Umfang und Bedeutung bestehender und potenzieller Umweltauswirkungen von Technologien zu verstehen und zu bewerten. Dieser systembasierte Ansatz nachhaltiger Bewirtschaftung analysiert Auswirkungen entlang der gesamten Lieferkette, einschließlich Herstellung, Produkteinsatz und Entsorgung von Altgeräten. Die Ökobilanz ist in der Bioenergie-Branche vielleicht mehr als in jeder anderen Industrie etablierte Praxis und reicht von Kraftstoffen über Gebäude- und Prozesswärme bis hin zu Brennstoff für den Energiesektor.

Investoren, Regulierungsbehörden und Branchenführer verlassen sich auf zuverlässige, genaue Emissionsvorhersagen, die eine wirksame Regulierung, Politik und Programme zur Minderung von THG-

Emissionen unterstützen. Somit ist es wichtig, diese Bedenken in dieser kritischen Forschungsstudie zu berücksichtigen. Die Bedenken werden erörtert, um zu einer Differenzierung zwischen problematisch und nachhaltig bewirtschafteten, kohlenstoffarmen Bioenergie-Lieferketten beizutragen. Während die Kontroverse der letzten Zeit nachstehend beschrieben wird, muss nachdrücklich darauf hingewiesen werden, dass die Auswirkungen jeder Bioenergie-Technologie, wie auch jeder anderen Technologie in hohem Grad vom Einzelfall abhängt.

Beispielsweise hat die Forschung in jüngster Zeit die Vorteile der Bioenergie, wie auch der Industriestandards bei den Praktiken der Kohlenstoffbilanzierung hinterfragt, die üblicherweise zur Messung der Auswirkungen von Kohlenstoff verwendet werden.^{5,6,7} Angesichts der Tatsache, dass die Zeit für effektive Klimamaßnahmen drängt, geht es hier um wesentliche Bedenken. Zusätzlich zu der öffentlichen Verwirrung mögen Regulierungsbehörden sich zu einem Zeitpunkt, zu dem Energieversorgungsunternehmen bemüht sind, für ihre Portfolios schnell eine Kohlenstoffreduzierung zu erreichen, zusehends über die Emissionsauswirkungen von Bioenergie unsicher sein.

Die angesprochenen Bedenken sind zwar wichtig, allerdings konzentriert sich dieses Forschungspapier sich nicht auf Bioenergie-Lieferketten aus fragwürdiger Nachhaltigkeit. Die Vorteile von Biomasse auf Holzpellet-Basis sind von unterschiedlichen Spezifikationen abhängig und schlecht konzipierte Systeme könnten sich negativ auf die Kohlenstoffemissionen auswirken. Vor dem Hintergrund, dass die Regierung und die Industrie fordern, dass diese Strategien erhebliche Reduzierungen der Kohlenstoffemissionen beinhalten, ist es Ziel dieses Berichtes, zu erwägen, wie gut konzipierte Brennstoff-Lieferketten auf Holzpellet-Basis zu vorteilhaften Emissionsreduzierungen führen könnten.

Aufgrund der Beschaffenheit eines großen, komplexen Energieversorgungsnetzes besteht die schnellste und effektivste Reduzierungsstrategie für Treibhausgase aus einem umfassenden Ansatz, der die einmaligen Attribute jeder kohlenstoffarmen Technologie gewinnbringend nutzt.

Biomasseerzeugungswerke haben den Vorteil, dass sie dynamisch reagieren können, um die variable Stromversorgung anderer, intermittierender erneuerbarer Ressourcen auszugleichen und so dazu beizutragen, dass Systembetreiber Versorgungsunterbrechungen vermeiden können. Dadurch, dass sie dazu beitragen, die mit der Unstetigkeit verbundenen Probleme zu beheben, kann Strom aus Biomasse letztlich den Umfang der Einführung von Solar- und Windenergiestrukturen auf Energiemärkten erhöhen. Im Allgemeinen wird dieser Netzausgleichsdienst von Erdgaskraftwerken unterstützt und führt zu erheblichen THG-Emissionen.

Angleichung der Holzpellet-Biomasse an die Ziele für nachhaltige Entwicklung

Mit der Einführung der 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung (SDG) der Vereinten Nationen im Jahr 2012 wurde beabsichtigt, Fortschritte in Bezug auf die unmittelbaren Herausforderungen in den Bereichen Umwelt, Politik und Wirtschaft zu erzielen, mit denen unsere Welt konfrontiert wird. Seither haben die Vereinten Nationen (VN) die SDG als Kernstück ihrer Agenda für nachhaltige Entwicklung aus 2015 verabschiedet, mit der ein Plan für Friede und Wohlstand der Menschen und des Planeten erreicht werden soll.⁸ Die Stromerzeugung aus Biomasse auf Holzpellet-Basis entspricht vier dieser SDG.

SDG 3: Ein gesundes Leben für alle Menschen jeden Alters gewährleisten und ihr Wohlergehen fördern. Je nach Beschaffenheit des Holzpellets einsetzenden Werks reduziert die Stromerzeugung aus Holzpellets im Verhältnis zu Kohle die luftverunreinigenden Stoffe.

SDG 7: Zugang zu bezahlbarer, verlässlicher, nachhaltiger und moderner Energie für alle sichern. Die Stromerzeugung aus Holzpellets ermöglicht eine zuverlässige, saubere und bezahlbare Form des Stroms. Da es kostengünstiger ist, Kohlewerke auf die Erzeugung von Strom und Wärme auf Holzpelletbasis umzustellen, als neue Kraftwerke zu bauen, und die bestehende Infrastruktur gleichzeitig wiederverwendet wird, ist dies eine zuverlässige und bezahlbare Alternative zu fossilen Brennstoffen.

SDG 13: Umgehend Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels und seiner Auswirkungen

ergreifen. Bei der Strom- und Wärmeerzeugung aus Holzpellets werden im Vergleich zu Kohle- und Erdgaskraftwerken weniger CO₂-Emissionen erzeugt.

SDG 15: Landökosysteme schützen, wiederherstellen und ihre nachhaltige Nutzung fördern. Weltweit sind Millionen Menschen in Bezug auf sauberes Wasser, Schutz, Nahrungsmittel und Arbeitsplätze auf lebenserhaltende Waldökosysteme angewiesen. Somit ist ein gesundes Waldwachstum unbedingt erforderlich. Allgemeine Biomasse-Verordnungen in Kombination mit den eigenen nachhaltigen Messsystemen von Enviva sollen, wie im folgenden Abschnitt dargestellt, sicherstellen, dass Waldökosysteme geschützt werden.



Argumente für eine nachhaltige Forstwirtschaft

Seit die Europäische Gemeinschaft (EG) die neue Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED II) eingeführt hat, die Biomasse den EU-Rahmenbedingungen zuordnet, müssen die nach Europa transportierten Holzpellets aus Waldflächen stammen, die zur Wiederaufforstung ausgewiesen sind. Für den Biomasse-Rohstoff gab es außerdem weitere Kriterien, wobei ein besonderes Augenmerk der Landnutzungsänderung galt.⁹ Diese Kriterien wurden aufgestellt, um die Nachhaltigkeit von Wärme und Strom aus Biomasse aufrechtzuerhalten. Entsprechend den EERL (RED II)-Regeln sind Naturgebiete zu schützen, bewirtschaftete Wälder zu regenerieren und eine langfristige Produktionskapazität und gesunde Wälder sind aufrechtzuerhalten und zu verbessern.^{10,11}

An der RED II-Richtlinie wird jedoch unter anderem kritisiert, dass diese zu stark vereinfacht ist und die Beseitigung von Forst-Restbeständen wie auch die Reduzierung der Kohlenstoffspeicherung im Boden und der Nährstoffverfügbarkeit übersieht, die zu geringerer Fruchtbarkeit der Böden und weniger Wachstum der Bäume führen könnten.¹² Im Gegensatz zu diesen wichtigen Bedenken überschreitet das jährliche Wachstum der Wälder im Süden der USA seit Jahrzehnten die kombinierte Ernte und natürliches Absterben.¹³ Das bedeutet, dass diese Wälder mehr Holzvolumen und Kohlenstoffspeicher enthalten, als vor 20 Jahren. Es gehört zwar nicht zum Thema dieser Studie, aber die Wälder in den nördlichen und westlichen Regionen der USA liefern ähnliche Ergebnisse für Wachstum gegenüber Ernte und Absterben.

Die Industrie der forstwirtschaftlichen Erzeugnisse leistet wichtige Beiträge zur Wirtschaft der USA. Die Regierung der USA begann unmittelbar nach dem Bürgerkrieg Ende der 1860er Jahre mit dem Verkauf naturbelassener Kiefernwälder als Waldland in der Region der westlichen Golfküste.¹⁴ Diese aufstrebende Holzwirtschaft ist so schnell gewachsen, dass es Ende der 1920er Jahre keine Altholzbestände mehr gab. Seither sind die meisten privaten Wälder in diesen Regionen zu Wirtschaftswäldern geworden. Wirtschaftswälder werden kontinuierlich bewirtschaftet, um der Industrie forstwirtschaftlicher Erzeugnisse Holz zu liefern. Angepflanzte Kiefern-Wirtschaftswälder im Südosten benötigen zwischen 25 und 40 Jahren, um einen Zyklus von der Ernte bis zur Neupflanzung zu vollziehen. Dieser ununterbrochene Zyklus sorgt in Amerika direkt für etwa eine Million Arbeitsplätze, während Forstarbeit knapp drei Millionen zusätzliche Arbeitsplätze schafft.

In vielen Fällen werden Wirtschaftswälder künstlich regeneriert, was für eine bessere Steuerung des Abstands zwischen den Bäumen und der Baumarten, eine höhere Überlebensrate der Bäume sorgt und bedingt durch die Auswahl der Arten, die Vorbereitung der Standorte für die Bepflanzung und weitere Praktiken maximales Wachstum sicherstellt.¹⁵ Da Bäume um Sonnenlicht und Nährstoffe konkurrieren, wachsen sie in eng bepflanzten Wäldern langsamer und sind weniger widerstandsfähig. Um langfristig die Forstproduktion und Gesundheit zu verbessern, wird ein normaler Wirtschaftswald vor dem endgültigen Einschlag ein- bis zweimal gelichtet, bevor er sich durch Neupflanzung oder natürliche Regeneration wieder erholt. Beim Auslichten, auch Durchforstung genannt, wird ein gewisser Prozentsatz der Bäume vor der endgültigen Ernte, bei dem alle Bäume entfernt werden, geschlagen. Das Auslichten führt dazu, dass die übrigen Bäume schneller wachsen und widerstandsfähiger sind und gleichzeitig Wildblumen und andere Pflanzen auf dem Waldboden aufgrund erhöhter Sonnenexposition gedeihen. Das wiederum wirkt sich positiv auf das Ökosystem aus, da so mehr Nahrung und Schutz für Waldtiere entstehen und die biologische Vielfalt des Waldstandortes verbessert wird. Die meisten der beim Auslichten entfernten Bäume und Äste sind zu klein, um für langlebige, hochwertige Erzeugnisse verwendet zu werden. Sie werden stattdessen zur Herstellung von Biomasse auf Holzpellet-Basis oder für die Produktion von Zellstoff und Papier verwertet.

Wenn Bäume ausgewachsen sind, werden sie für die Verarbeitung in der Zellstoff- und Sägewerksbranche geerntet. Es gibt unterschiedliche Einschlagmethoden, die alle besondere Vor- und Nachteile haben. Bei einigen Methoden werden nur einige der Bäume im Wald geschlagen, während die anderen für weiteres Wachstum stengelassen werden. Bei anderen Methoden werden ganze Waldabschnitte gerodet. In südlichen Kiefernplantagen werden einige Bäume vor der endgültigen Ernte, der eine schnelle Aufforstung folgt, ein- bis zweimal ausgelichtet. Der Kahlschlag ändert das Erscheinungsbild des Landes unmittelbar nach dem Abholzen und kann ästhetisch abstoßend sein. Das schnelle Wiederanwachsen in diesen Kiefernplantagen stellt den Wald und die dazugehörige Ästhetik jedoch innerhalb weniger Jahre wieder her.¹⁶

Betrachtet man den Lebenszyklus des Biomasse-Wachstums und den Prozess des Abholzens, ist die langfristige Bewertung der Forstwirtschaftspraktiken maßgeblich. Wenn alte Wälder spezifisch für Biomasse ohne Neupflanzungen oder natürliches Regenerieren gerodet werden sollten, würden die THG-Emissionen von Strom und Wärme aus Biomasse in den meisten Fällen, aufgrund der geringeren Verbrennungseffizienz, die von Kohle übersteigen. Das ist jedoch nicht der Fall.



Quelle: Angepasst aus Forest & Fish

Holzpellets, die für die Strom- und Wärmeproduktion aus Biomasse verwendet werden, werden aus minderwertigen Bäumen und Teilen von Bäumen erzeugt, die im Zuge traditioneller Holzernte anfallen und werden nur aus Wäldern bezogen, die zur permanenten Regenerierung bewirtschaftet werden. Holz, das für Holzpellets verwendet wird, ist ein minderwertiges Produkt aus herkömmlicher Holzernte in bewirtschafteten Wäldern und umfasst minderwertiges Faserholz, Baumkronen und Rückstände von

Kiefern- und Hartholzarten. In einem nachhaltig bewirtschafteten System wird der Kohlenstoff, der bei der Verbrennung von Biokraftstoff als CO₂ freigesetzt wird, kontinuierlich durch die CO₂-Aufnahme aus Waldwachstum ausgeglichen und gilt als „kohlenstoffneutral“. Andere CO₂-Emissionsquellen, beispielsweise Diesel und Strom für Ernte, Verarbeitung und Transport werden in der Ökobilanz berücksichtigt.

Die wirtschaftlichen Überlegungen bei der Nutzung minderwertiger Teile der Bäume für Biomasse erklären, warum Unternehmen wie Enviva aus derartigem Holzmaterial Holzpellets herstellen. Damit Energie aus Biomasse wirtschaftlich tragbar ist, wird nur Holzmaterial mit geringem Wirtschaftswert für die Herstellung von Holzpellets verwendet. Dieses Material kann von keiner anderen Industrie verwertet werden. Zu diesen Nebenprodukten gehören Rückstände aus Sägewerken, einschließlich Sägemehl und Späne, wie auch Hackschnitzel aus im Wald geschlagenen, minderwertigen Bäumen. Zu diesen Rohstoffen können auch Kleinteile aus der Baumdurchforstung, Äste und schwache oder schlecht gewachsene Bäume gehören, die nicht in einem Sägewerk verarbeitet werden können und deren Beseitigung zu gesundem Forstwachstum beiträgt.

Das [Track & Trace™-System](#) von Enviva sorgt für Transparenz in Bezug auf die Herkunft des Holzrohstoffes. Auf der Grundlage dieser veröffentlichten Daten bestanden die Holzpellets von Enviva 2018 zu 17 % aus Rückständen aus Sägewerken und zu 83 % aus Nebenprodukten.¹⁷ Von den 83 % Nebenprodukten entfielen etwa 50 % auf Hackschnitzel und 50 % auf Rundholz. Gestützt auf Fotos von Baumstämmen, die in Holzpelletanlagen gebracht werden, behaupten einige Umweltgruppen, dass Enviva und andere Biomasseproduzenten „ganze Bäume“ in ihre Anlagen liefern.¹⁸ Enviva bestätigt, dass das Unternehmen Bäume in ihrer intakten Form verarbeitet, wobei es sich jedoch ausschließlich um Bäume handelt, die sich aufgrund ihrer Größe, vorhandener Fehler oder Krankheiten nicht für die Verarbeitung in der Sägewerks- und Zellstoffindustrie eignen oder aus anderen Gründen für eine hochwertige Nutzung im Bauwesen oder als Sägerundholz abgelehnt werden. Auf der Grundlage der Marktpreise ist es für Eigentümer von Forstgrundstücken wirtschaftlich nicht sinnvoll, hochwertige ganze Bäume als minderwertige Biomasse zu verkaufen. Denn diese hochwertigen Bäume würden einen wesentlich höheren Preis als qualitativ höherwertiger Rohstoff erzielen, beispielsweise als Stämme für ein Sägewerk.

Es gibt Zertifizierungsprozesse und -systeme, um sicherzustellen, dass das für Holzpellets verwendete Ausgangsmaterial aus nachhaltiger Herkunft stammt. Die Zertifizierung durch Dritte ist derzeit der beste Mechanismus zur Klärung der aktuellen Rechenschaftspflicht bei der Beschaffung von Holz-Biomasse. Forsteigentümer, die ihre Produkte als „nachhaltig“ oder „umweltgerecht“ verkaufen wollen, müssen die von den entsprechenden Programmen festgelegten Leitlinien und Regeln befolgen, die das Ökosystem, die Tierwelt und saubere Gewässersysteme schützen.¹⁹ Die drei größten Zertifizierungsprogramme im Süden der USA sind die Sustainable Forestry Initiative (SFI), der Forest Stewardship Council (FSC) und das American Tree Farm System (ATFS). Diese drei unabhängigen Zertifizierungsprogramme sichern, dass die Wälder von den Forsteigentümern verantwortungsbewusst, umweltfreundlich, sozialverträglich und wirtschaftlich behandelt werden. Darüber hinaus kann der Käufer als Endabnehmer so sicher sein, dass das Holz in seinem Produkt nachhaltiger Herkunft ist. Im Rahmen dieser Systeme werden bestimmte Waldflächen zertifiziert – d. h. sie sind landbezogen und zertifizieren bestimmte Bodenparzellen.

Enviva besitzt selbst keinen Wald, ist aber in vollem Umfang durch das Sustainable Biomass Program (SBP) zertifiziert. Jedoch stammen nur 23 % des von Enviva für die Pelletproduktion bezogenen Holzes aus Wäldern, die 2018 nach den strengeren Zertifizierungsprogrammen SFI, FSC oder ATFS zertifiziert waren.²⁰ Das Erreichen eines höheren Zertifizierungsprozentsatzes wird dadurch in Frage gestellt, dass mehr als 85 % der Waldflächen im Südosten der USA in Privatbesitz sind und viele Landbesitzer weniger als 810 ha besitzen.²¹ Kleinere Waldparzellen werden häufig nicht zertifiziert, da die Zertifizierung für die Eigentümer eine relativ hohe finanzielle Belastung bedeutet. Da Rohstoffe für Holzpellets normalerweise zum geringsten Wert verkauft werden, besteht die Gefahr, dass die Marktvorteile zertifizierter Forstprodukte die Kosten für diese kleinen Forstbesitzer nicht wettmachen würden.

Daher wurde das SBP-Zertifizierungssystem spezifisch auf Holzpellets und Hackspäne zugeschnitten, die für Bioenergie verwendet werden und ermöglicht es zertifizierten Unternehmen, nachzuweisen, dass sie Holz-Biomasse wie Pellets und Hackspäne aus ökologisch bewirtschafteten Wäldern verwenden.²² Auch wenn SBP kompatibel ist, ersetzt es die vorgenannten Forstzertifizierungsprogramme nicht, sondern baut eher auf der von diesen etablierte Praxis auf. SBP ist auf die Aufrechterhaltung oder Steigerung des Forstvolumens, den Erhalt der biologischen Vielfalt und den Erhalt von Wäldern mit hohem Schutzwert ausgerichtet. Das System konzentriert sich auch auf Verwaltungspraktiken im gesamten Prozess der Lieferkette, um sicherzustellen, dass die gesamte Produktkette geschützt ist und kein nicht-nachhaltiges Holz mit nachhaltigem Holz vermischt wird.

Betrachtet man die Nachhaltigkeit von Holzprodukten für einen beliebigen Industriotyp, einschließlich der Biomasse-Industrie, ist es wichtig, die Kennzahlen für regionale, wie auch staatliche Wälder, beispielsweise die gesamte Forstfläche und Volumen stehender Bäume im Laufe der Zeit zu betrachten. Privatwälder wachsen, weil die Grundeigentümer einen Anreiz zur Neuanpflanzung oder der natürlichen Regenerierung von mehr Bäumen haben, als sie einschlagen. Somit sichern sie sich künftige Einnahmen aus dem Verkauf von Bäumen an die Industrie der Forstprodukte. Mit Envivas Angebot, minderwertiges Holz und Rückstände zu kaufen, das an keine andere Industrie verkauft werden kann, ist ein noch größerer Anreiz gegeben, der somit zu mehr Bäumen und Waldfläche führt. Forscher an der Duke University und den North Carolina State Universities bestätigen diese Aussagen.²³ Ihre Forschungsarbeiten haben eine direkte positive Verbindung zwischen der Nachfrage nach Holzpellets und dem Wachstum von Waldflächen aufgezeigt. Aus Forschungsarbeiten des United States Department of Agriculture Forest Services geht ebenfalls hervor, dass das Gesamtvolumen gedeihender Bäume im Zeitraum 2013-2018 alleine in North Carolina um etwa 113,27 Mio. Kubikmeter zugenommen hat.¹³ Wichtig ist, dass die Argumentation, private Wirtschaftswälder „in Ruhe zu lassen“, nicht logisch ist, da eine größere Gefahr besteht, dass Wälder von geringem oder keinem wirtschaftlichen Wert von forstwirtschaftlicher Nutzung in nicht-forstwirtschaftliche Nutzung umgewandelt werden.

Envivas Umweltprofil

Im Herbst 2019 wurde eine unabhängig finanzierte Ökobilanz der Stromproduktion unter Verwendung von Holzpellets von Enviva erstellt. Mit der individuell angepassten Methode von Boundless wurde eine quantitative Bewertung der THG-Emissionen und anderer Umweltauswirkungen im gesamten Lebenszyklus von Holzpellets, angefangen von der Rohstoffbeschaffung über die Pelletproduktion und bis zur Auslieferung zur Endbestimmung des Brennstoffes im Vereinigten Königreich, durchgeführt.

In der Folgenabschätzung von Boundless wurde Strom aus Holzpellets mit alternativen Formen der Stromproduktion anhand mehrerer Kennwerte verglichen:

- Auswirkung von Treibhausgasen
- Luftschadstoffe
- Energierücklaufzeit
- Kohlenstoffrücklaufzeit
- Stromkosten
- Kohlenstoff-Rendite

Zwei externe Sachverständige aus der Industrie wurden beauftragt, unabhängig die Ergebnisse der Folgenabschätzung von Boundless zu prüfen:

- Robert Eckard, PhD, von Momentum (USA), ein Spezialist für Energie- und Biomassetechnologie, Umwelt- und Fondsentwicklung mit einem fundierten Hintergrund in quantitativer Lebenszyklus- und Wirtschaftsanalyse für moderne Bioenergie.
- Charles Levesque, ein Spezialist für Umweltprüfung und Forstmanagement, lizenzierter professioneller Förster und CEO von Innovative Natural Resource Solutions, LLC.

Die THG-Komponenten der Folgenabschätzung von Boundless werden im Auswirkungsprofil THG-Zusammenfassung in untenstehendem Abschnitt dargestellt. An einer umfassenderen

Zusammenfassung interessierte Leser sollten mit Boundless Impact Investment Kontakt aufnehmen.

Auf die einleitende Folgeabschätzung folgte eine zweite Phase von Enviva finanzierter Forschung mit dem Ziel, die Erfordernisse zu untermauern, die für eine Einschätzung der Praxis als „nachhaltig“ benötigt werden, und um Vorteile für das Klima sicherzustellen. Diese zielt auch auf eine Bewertung der Marktauswirkungen ab, wenn in Kundenwerken aus Holzpellets gewonnener Strom verwendet wird und, um die Nettoauswirkungen auf die THG-Emissionen des Energiesektors abzuschätzen.

Für letztere Bewertung wurde der Energiesektor für das Vereinigte Königreich, Deutschland und Japan modelliert, um potenzielle Vorteile von Strom und Wärme aus Holzpellets als Bestandteil des vielfältigen Energieversorgungs-Mix jedes Landes aufzuzeigen. Da diese drei Länder eine langfristige Reduzierung der THG-Emissionen anstreben, wurden Szenarien mit unterschiedlichem Strombeitrag aus Holzpellets im Rahmen der Bemühungen jedes Landes modelliert, erneuerbare Energien und Atomenergie im Verhältnis zu den jeweiligen Emissionszielen zu erhöhen. Jedes Szenario und seine Auswirkungen auf die Gesamtemissionen des Energiesektors wird in nachstehendem Abschnitt in einer Bewertung der Marktauswirkungen zusammengefasst.

Auswirkungsprofil THG-Zusammenfassung für die Stromproduktion auf Basis von Holzpellets im Vereinigten Königreich

Die Umweltauswirkungen von im Vereinigten Königreich mit Holzpellets aus dem Südosten der USA erzeugtem Strom wurde mit der Stromerzeugung aus anderen Quellen verglichen. Dazu gehörten Kohle, Erdgas, Solarpanels und Windenergie. Bei dem Vergleich wurden folgende Prozesse bewertet:

- Ökobilanz-Beiträge und Auswirkungen für Holzpellets
- Holzernte
- Transport aus dem Wald zum Pellet-Produktionswerk
- Methanemissionen aus der Lagerung der Holzrohstoffe
- Pelletproduktion
- Transport aus dem Pellet-Produktionswerk zum Hafen
- Transport ins Vereinigte Königreich

Im Rahmen dieser Studie wurden die zuvor erörterten Leistungskennzahlen anhand einer Fallstudie bewertet, deren ausdrückliches Ziel nachhaltige Forstwirtschaft ist. Diese Fallstudie ist von stationärer Holzproduktion und -verbrauch ausgegangen und hat die CO₂-Emissionen aus der Pelletlagerung und der Verbrennung des Brennstoffes im Kraftwerk als kohlenstoffneutral eingestuft.

Die Annahmen zum Kohlenstofffluss und zur Kohlenstoffneutralität sind für jede Ökobilanz von Bioenergie maßgeblich. Solche Festlegungen geben in der Industrie der Bioenergie häufig Anlass zu Kontroversen und müssen fallspezifisch sein. Wenn die Lieferketten von Bioenergie Einfluss auf die Umwandlung von Waldflächen in andere Nutzungen nehmen oder ansonsten zu rückläufigem Kohlenstoffspeicher führen, sollte die dazugehörige Kohlenstoffanalyse diese Verluste ausweisen und ist eine kritische Bewertung von wirtschaftlichen und politischen Determinanten erforderlich. In dieser Fallstudie stammt die Biomasse-Produktion ausdrücklich aus kontinuierlich geernteten und regenerierten „Wirtschaftswäldern“, nicht aus der Umwandlung von Forstflächen für andere als Forstnutzungen. Auf der anderen Seite nehmen die Kohlenstoffspeicher in den Wäldern im Südosten der USA zu. Betrachtet man regionale und staatliche Forste einschließlich aller Arten Eigentümer, so haben Fläche, Volumen und Kohlenstoffspeicher jährlich um einen stabilen Prozentsatz zugenommen.^{13,24}

Die wichtigsten ökonomischen Faktoren für die Ernte von Wirtschaftswäldern sind die hochwertigsten Holzprodukte, wie zum Beispiel Sägeholz, das zu Planken verarbeitet wird, während die Rohstoffe für Holzpellets in erster Linie aus Nebenprodukten stammen. Die von Dritten geprüfte Beschaffung von Enviva setzt voraus, dass die Rohstoffe bestimmten Kategorien entsprechen: Restholz oder Abfälle, die von der Holzindustrie nicht genutzt werden.²⁵ Normalerweise gehören Rückstände aus Sägewerken,

Baumkronen, Zweige und minderwertige Bäume, die zu klein oder von zu schlechter Qualität sind, um in anderen Bereichen der Industrie der Forstprodukte verwendet zu werden, zu diesem Material. Die EU-Richtlinie für Erneuerbare Energien (RED II), die in dieser Fallstudie für Brennstoff gilt, beinhaltet Kriterien für Rohstoffe mit besonderem Augenmerk auf eine Änderung der Landnutzung.⁹ Laut dieser Richtlinie sind Naturgebiete zu schützen, bewirtschaftete Wälder zu regenerieren und eine langfristige Produktionskapazität und gesunde Wälder sind aufrechtzuerhalten und zu verbessern.^{10,11} Beispielsweise kann das Holz, das zu Holzpellets verarbeitet wird, nicht aus Waldflächen stammen, die für einen anderen Zweck als zur Aufforstung vorgesehen sind.

Möglicherweise ist der verwirrendste Aspekt der Kontroverse um die Kohlenstoffneutralität die Berücksichtigung des Kohlenstoffs im Biobrennstoff selbst. Es sollte nicht *vorausgesetzt* werden, dass Biokraftstoff im Sinne des gesamtheitlichen Lebenszyklus treibhausgasneutral ist, ohne fallspezifisch alle Einträge, Quellen und Leistungsverbraucher einschließlich Probleme in Verbindung mit Änderungen der Landnutzung betrachtet zu haben, die vorstehend angesprochen werden. Die Kohlenstoffatome im Brennstoff selbst, die scheinbar unwiderlegbar neutral sind, sind in der Forschung umstritten, die sich mit breiter angelegten Belangen der Industrie befasst. Aus rein physikalischer Sicht werden die biogenen Kohlenstoffatome aus regenerierenden Wäldern oder landwirtschaftlichen Systemen von der Atmosphäre absorbiert und sind physisch in den Holz- und landwirtschaftlichen Produkten enthalten. Diese Kohlenstoffatome werden durch Zersetzung (bei langlebigen Produkten wesentlich langsamer) oder Verbrennung wieder in die Atmosphäre freigesetzt. Land- und forstwirtschaftliche Systeme verwerten permanent Kohlenstoff aus der Atmosphäre wieder in Pflanzen, der anschließend zurück in die Atmosphäre gelangt. Im Gegensatz zu dem rezirkulierenden biogenen Kohlenstoffzyklus stellt die Verbrennung von Kohle und Gas praktisch eine Einbahnstraße vom geologischen Speicher in die Atmosphäre dar, d. h., dass Kohle- und Erdgasformationen Kohlenstoff erst nach Millionen von Jahren wieder absondern. Wenn Holzpellets zur Verstromung verwendet werden, verdrängt kontinuierlich recycelter biogener Kohlenstoff den Einweg-Kohlenstoff aus Kohle und Erdgas.

Ein anderer Ansatz zur Anrechnung der Kohlenstoffabsorption, die während des Pflanzenwachstums erfolgt, ist die Verrechnung der Kohlenstoffemissionen zum Zeitpunkt der Verbrennung, wodurch eine "Kohlenstoffschuld" entsteht, die über zukünftige Wachstumszyklen zurückgezahlt werden muss. Die Vorstellung, das Bio-Strom vorübergehend mehr Kohlenstoff freisetzt, als Kohle oder dass Bio-Strom den Kohlenstoff jahrelang „nicht zurückzahlt“, ist auf diese Art Bilanzierungspraxis zurückzuführen. Objektiv gesehen ist die Bilanzierung der Kohlenstoffschuld nicht die „richtige Art“, um die THG-Auswirkungen zu messen und ist auch nicht intuitiver, als biogenen Kohlenstoff während des Waldwachstums anzurechnen. Ungeachtet der Bilanzierungspraxis erreichen gleichwertige regenerative Systeme letztlich den gleichen stabilen Kohlenstoffstrom und führen im Verhältnis zu Kohle zu langfristigen Emissionsreduzierungen. Im Falle der EU-Märkte berücksichtigen die Regulierungsbehörden den im Biokraftstoff enthaltenen Kohlenstoff als neutral, was mit dem physikalischen biogenen Kohlenstoffkreislauf übereinstimmt. Die Analyse des Strommarktes für diese Forschungsarbeit entspricht dieser Regulierungsnorm. Wichtig ist, dass sie zusätzliche Einträge möglicher Methanemissionen aus der Rohstofflagerung einbezieht, deren Berücksichtigung wichtig ist. Während diese in behördlichen Berechnungen nicht enthalten sind, umfassen sie geringe, aber maßgebliche Auswirkungen von Kohlenstoff, die gut bewirtschaftet werden müssen, um sicherzustellen, dass Energie aus Biomasse die Kohlenstoffauswirkungen maximiert.

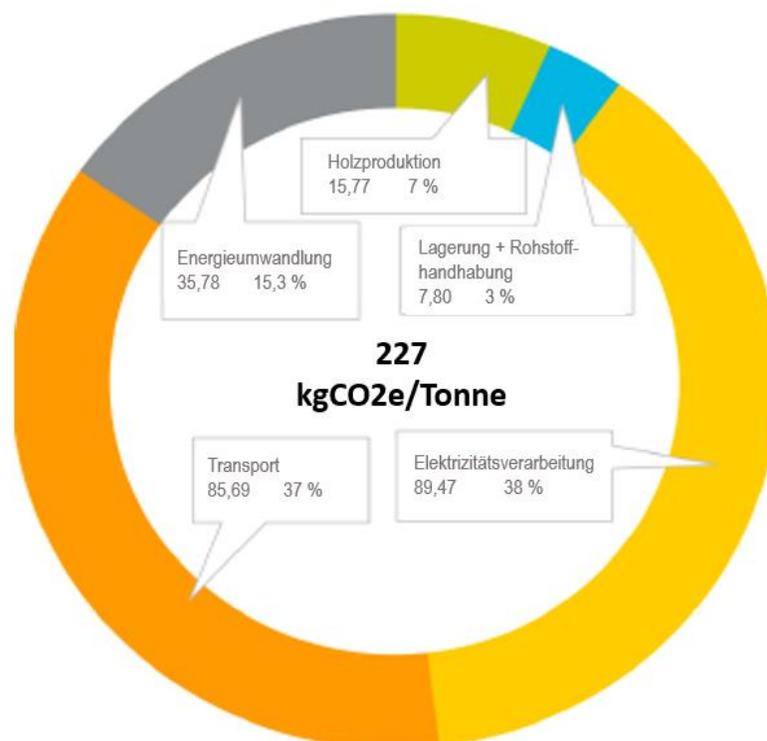
Damit wurden die THG-Emissionen von Elektrizität aus Holzpellets im Vereinigten Königreich auf 227 kg CO₂e pro Tonne verbrauchten Brennstoffs geschätzt, was 0,13 kg CO₂e/kWh entspricht. Im Einzelfall kann die Emissionsrate an Standorten, an denen eine Abwärmerückgewinnung möglich ist (z. B. in Kraft-Wärme-Kopplungssystemen) wesentlich geringer ausfallen.

Eine Zusammenfassung der prozentualen Kohlenstoffbeiträge jedes Prozessschrittes wird nachstehend dargestellt:

- Transport 37 %
- Verarbeitung von Holzpellets 38 %
- Lagerung 3 %
- Energieumwandlung 15 %
- Holzproduktion 7 %

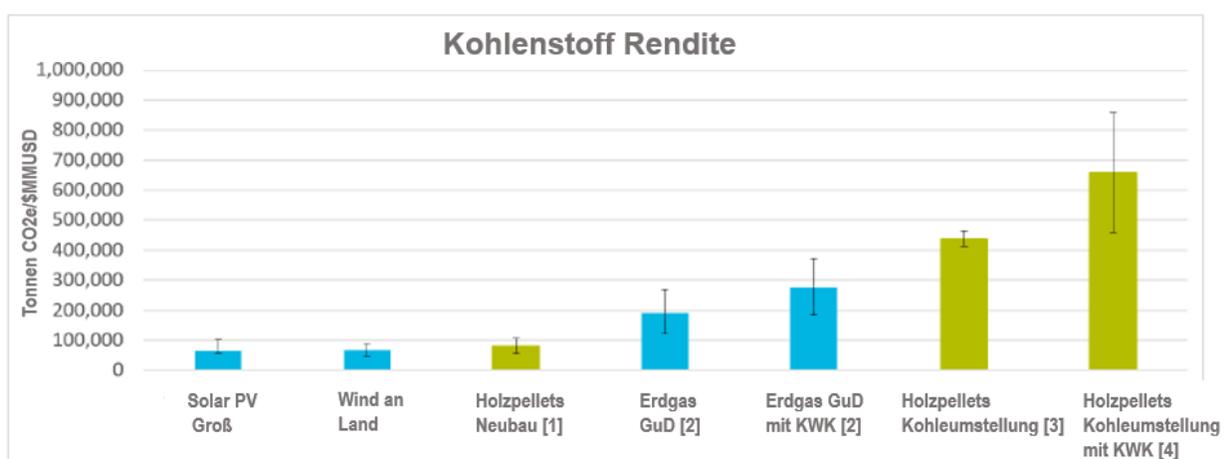
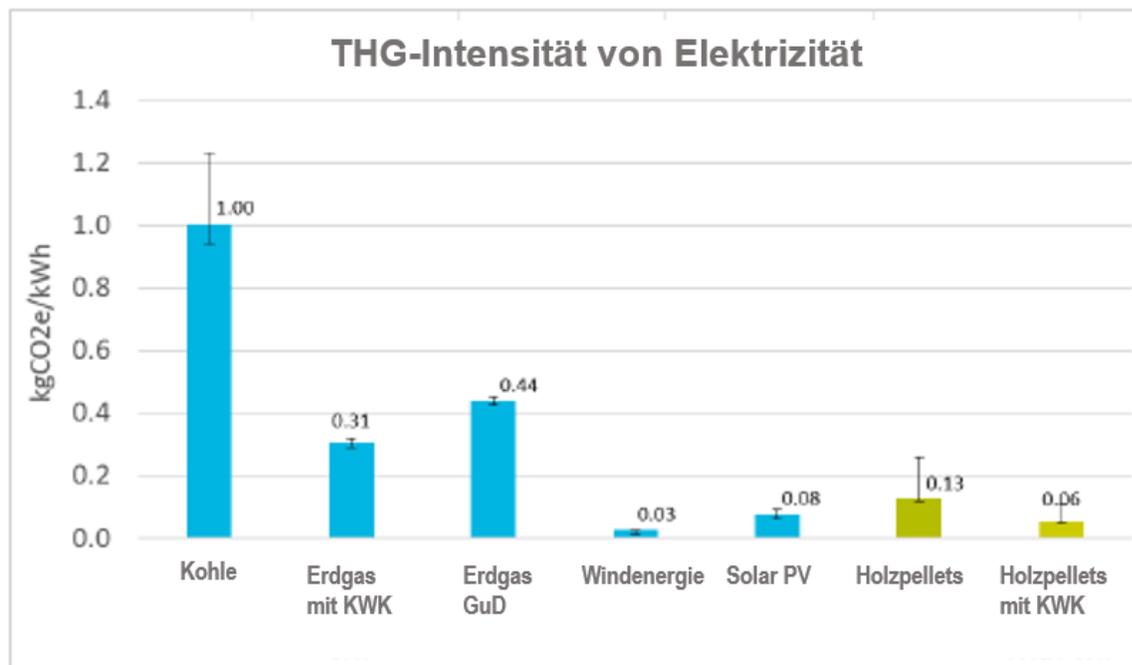
Zu den Transportphasen gehört der LKW-Transport des Rohstoffes aus dem Wald in das Pellet-Verarbeitungswerk und der erzeugten Pellets in Häfen in den USA. Der Seetransport zum Lager im Vereinigten Königreich beinhaltet Methanemissionen während der Lagerung des Rohstoffes Holz, wie auch Emissionen während der Handhabung des Rohstoffes.

Betrachtet man den gesamten Lebenszyklus, setzt Elektrizität, die mit auf Holzpellets basierender Biomasse erzeugt wird, pro Kilowattstunde wesentlich weniger THG-Emissionen frei als aus Kohle (87 % Minderung) und Erdgas (71 % Minderung) gewonnene Elektrizität. Analysen haben ergeben, dass die THG-Intensität von Elektrizität auf Holzpellet-Basis etwas über den Werten liegen, die normalerweise für Wind- und Solarenergie genannt werden. Jeder dieser Werte lag jedoch jeweils weit unter den Emissionswerten für Kohle und Erdgas. Auf der Grundlage geschätzter und aufgezeichneter Werte würde man beim 1:1 Ersatz von Kohlestrom durch Holzpellets 87 % Emissionsreduzierung, durch Solarstrom 92 % und durch Windenergie 97 % erreichen.



Die Forschungsarbeit umfasst Industrieanalysen Dritter, aus denen hervorgeht, dass Kohlekraftwerke zu wesentlich geringeren Kapitalkosten auf den Einsatz von Holzpellets als Brennstoff umgestellt werden können, als es für den Bau neuer Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energien erforderlich wäre. Koppelt man diese niedrigeren Baukosten mit der größeren Erzeugungskapazität pro Jahr, erhält man einen sehr hohen Wert für die Kohlenstoffrendite (CROI). CROI ist eine Kennzahl, die Kohlenstoffeinsparungen pro eine Millionen US\$ schätzt, die in eine Technologie investiert werden. Wie nachfolgend gezeigt, weist ein Kohlekraftwerk, das auf Holzpellets umgestellt wird, einen extrem hohen CROI auf, wenn die Restwärme aus der Verbrennung als Teil eines integrierten Kraft-Wärme-

Kopplungssystems (KWK) genutzt werden kann. Pro eine Million US\$, die in die Kohleumstellung investiert werden, werden 658.000 t CO₂e aus Kohlestrom und Erdgaswärme vermieden, wenn die KWK einbezogen wird. Die Investitionen in ein neues, kleines, dediziertes Biomassewerk ohne KWK ist zwar teurer, jedoch wird die CO₂e Reduzierung pro Million investierter US\$ trotzdem auf 80.800 Tonnen geschätzt und schneidet aufgrund der großen jährlichen Stromproduktion der Holzpellet-Kraftwerke im Vergleich mit Wind- und Solarenergie günstig ab. Aufgrund geringer Kapitalkosten schneiden mit Erdgas betriebene Kraftwerke bei der CROI-Kennzahl günstig ab. Wichtig ist jedoch, dass mit Erdgas keine tiefgreifenden Emissionsreduzierungen erreicht werden können. Somit muss der Gesamtbeitrag von Erdgas zum Stromerzeugungsmix begrenzt werden, um klimastabilisierende Emissionswerte zu erreichen.



[1] Neubau Elektrizitätswerk - nur Holzpellet Biomasse Kraftwerk - mit Eingangs-Kapitalkosten in Höhe von 2.717 \$/kW.

[2] Siehe Erörterung im Text des Berichtes bezüglich der Einschränkungen von Erdgas, um Ziele tiefgreifender Kohlenstoffreduzierung zu erreichen.

[3] Umstellung eines bestehenden Kohlekraftwerks auf den Einsatz von Holzpellets mit Eingangs-Kapitalkosten in Höhe von 270 \$/kW.

[4] Umstellung eines bestehenden KWK-Kohlekraftwerks auf den Einsatz von Holzpellets mit Eingangs-Kapitalkosten in Höhe von 270 \$/kW.

Marktanalyse - Strom aus Holzpellets senkt die Emissionen des Energiesektors

Für die Analyse des Potenzials von Elektrizität auf Basis von Holzpellets, um THG-Emissionen bei größerer Nutzung in den nationalen Energiesektoren zu reduzieren, wurden Fallstudien aus dem Vereinigten Königreich, Japan und der Region Deutschland und Nachbarländer berücksichtigt. Wie im Folgenden getrennt erörtert, verfolgt jedes dieser Länder ehrgeizige Ziele, um saubere Energie zu fördern.

Zur Bewertung der marktweiten Nettoauswirkungen der Treibhausgasemissionen wurde ein Modell zur Erweiterung der Versorgungskapazität zusammen mit den im vorigen Kapitel dargestellten Faktoren für die Elektrizitätsemissionen über den Lebenszyklus von Holzpellets verwendet.²⁶ Zunehmender Einsatz von Holzpellets als Brennstoff wird somit, genau wie der Einsatz anderer erneuerbarer Ressourcen, zu weniger Energieerzeugung aus Kohle, Erdgas und Diesel führen, da die Netzbetreiber erneuerbare Quellen zu niedrigeren Kosten und mit weniger Emissionen vorzugsweise „abrufen“, um der Nachfrage zu entsprechen. Das Besondere an Energie auf Basis von Holzpellets ist jedoch der direkte 1:1 Ersatz der Energieerzeugung aus Kohle durch Umstellung des Brennstoffes in einzelnen Kraftwerken. Die Modellberechnung erfasst sowohl die direkte Umstellung, als auch sekundäre Auswirkungen des Abrufs von Energie.

Für jede Region wurden der bestehende Kraftwerkspark und die erneuerbare Energieerzeugung auf der Grundlage von Daten aus der Open-Source-Datenbank Global Power Plants Database (GPPD) beschrieben.²⁷ Weiterhin wurde die Modellberechnung (anhand von Brennstoffpreisen, Leistung erneuerbarer Technologie und kürzlich hinzugekommenen und abgeschalteten Kraftwerken) kalibriert, so dass der simulierte Mix der Energieerzeugung dem Betrieb aus der Vergangenheit, der aus Berichten der Internationalen Energieagentur (IEA) hervorgeht, sehr nahe kommt.²⁸ Die Nachfrage nach Energie basiert auf den von der IEA berichteten Werten und ist während der Dauer der Analyse konstant.

Auswirkungen auf den Strommarkt des Vereinigten Königreichs

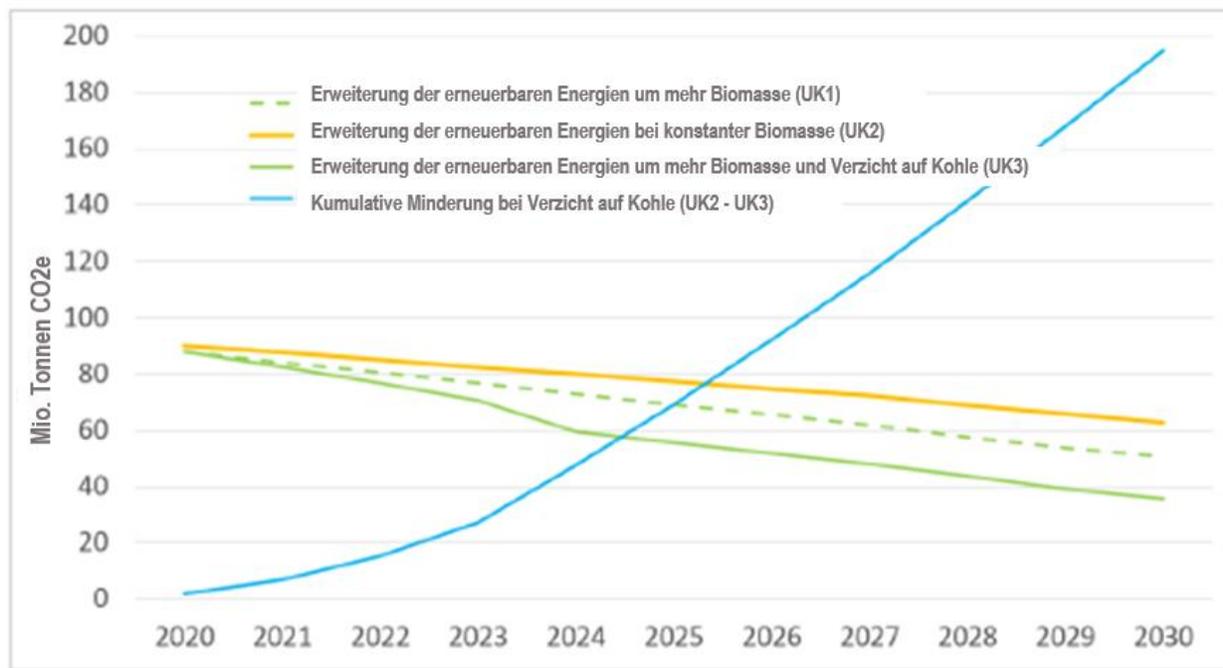
Im Vereinigten Königreich wurde die Abhängigkeit von Kohle in den letzten beiden Jahrzehnten drastisch reduziert. Kohle liefert heute nur noch 5 % der Stromversorgung.²⁹ Erdgas liefert mit 39 % den größten Beitrag zur Stromversorgung, während Atomstrom etwa 20 % ausmacht. Laut jüngster Schätzungen des britischen Department for Business, Energy & Industrial Strategy (Ministerium für Wirtschaft, Energie & Industriestrategie) kann unter den Voraussetzungen der heutigen Politik die Versorgung mit erneuerbarer Energie von 40 % im Jahr 2018 auf 59 % bis 2030 gesteigert werden. Es wurde geprüft, welche Reduzierung von THG-Emissionen erreichbar wäre, wenn 59 % der Energieversorgung des Vereinigten Königreichs durch einheitliche Steigerung des Beitrags von Wind-, Solar- und Biomassestrom von den aktuellen Werten auf einen um das 1,8-fache höheren Beitrag bis 2030 gedeckt würde. Wie nachstehend dargestellt, führt diese Strategie zu einer Reduzierung der THG-Emissionen um beeindruckende 43 % im Zeitraum von 2020 bis 2030 (s. Szenario UK1 in nachstehender Abbildung).

In dem oben beschriebenen Szenario lieferte Strom auf Basis von Holzpellets einen wesentlichen Beitrag zu den Emissionsreduzierungen. Zur Schätzung der Auswirkungen wurde dieses Szenario *ohne* erweiterte Beiträge um Brennstoff aus Holzpellets repliziert. Angesichts des Energieerzeugungsvorsorgungsmix im Vereinigten Königreich erfordert eine Minderung dieses Beitrags effektiv, dass Netzbetreiber Erdgas mit höheren Emissionswerten als Ausgleich verwenden. Die THG-Emissionen nahmen weiterhin, jedoch in geringerem Umfang ab (s. Szenario UK2) und erreichten eine Minderung um 31 % im Vergleich zu 2020 gegenüber 43 % im Szenario UK1. Bei einem direkten Vergleich der THG-Emissionen im Jahr 2030 lagen die Werte ohne erweiterten Beitrag durch Holzpellets um 24 % höher.

Ein drittes Szenario wurde simuliert, um den Vorteil der einmaligen Fähigkeit von Holzpellets zu berücksichtigen, Kohle zu ersetzen. In Szenario UK3 haben die Beiträge der Wind-, Solar- und Holzpellet-Energie zugenommen und die restliche Kohlestromerzeugung im Vereinigten Königreich wurde, wie

erwartet, Ende 2024 eingestellt. Das Ergebnis zeigte einen Rückgang der THG-Emissionen um 59 %.

Durch zusätzlichen weiteren Einsatz ergänzend zu Wind- und Solarenergie wird das emissionsreduzierende Potenzial von Holzpellets im Vereinigten Königreich in Szenario UK3 (mit erweiterter Nutzung von Holzpellets und vollständigem Verzicht auf Kohle) gegenüber UK2 (bei konstanter Biomasse und Beibehaltung von Kohle) durch 43 % weniger THG-Emissionen gekennzeichnet. Kumulativ liegt die THG-Emissionsreduzierung im Zeitraum 2020-2030 der beiden Szenarien bei 195 Mio. Tonnen CO₂e. Dieser Rückgang der THG-Emissionen entspricht 4 Mio. Fahrzeugen, die über zehn Jahre aus dem Verkehr gezogen werden.



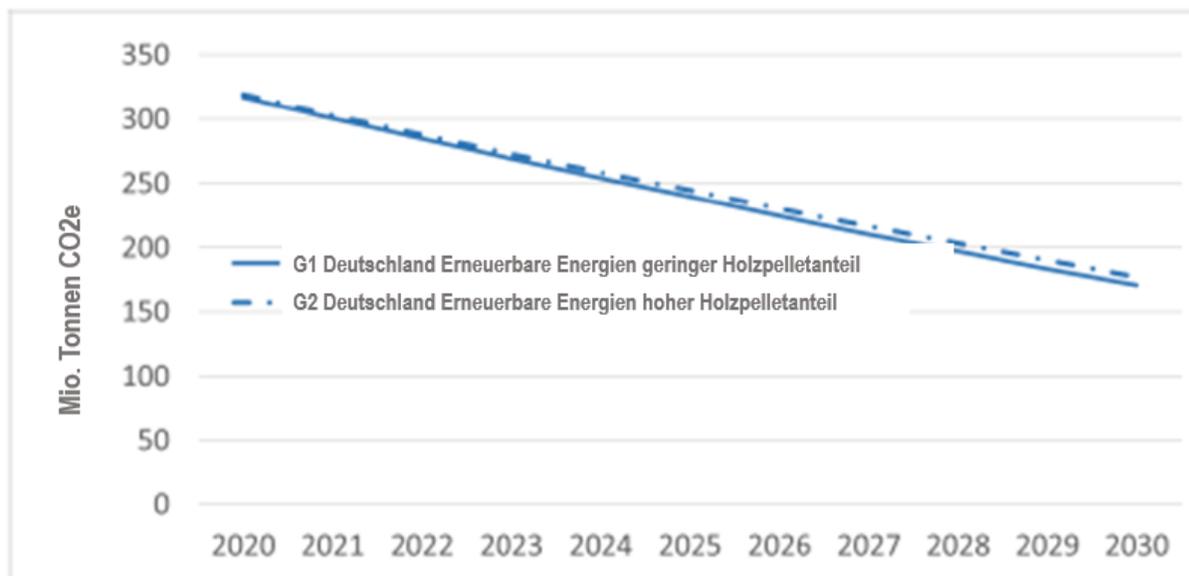
Auswirkungen auf den Strommarkt Deutschlands

Während Deutschland sich bei der Energieversorgung weiterhin auf einen erheblichen Beitrag von Kohle und Erdgas (2018: 32 % bzw. 19 %) stützt, fordern staatliche Aufträge die Erhöhung des Beitrags der erneuerbaren Energien zum Energiesektor von derzeit 40 % auf 65 % bis 2030. Aus jüngsten Berichten geht jedoch hervor, dass die Versorgungsindustrie auf Schwierigkeiten bei der Suche nach Standorten für Solar- und Windanlagen stößt, die ein wichtiges Hindernis für das Erreichen dieser Ziele darstellen und fordert zu einer Lockerung verordnungsbedingter Einschränkungen auf. Der vermehrte Einsatz von Holzpellets entspricht einer Strategie, um die Probleme mit der Standortfindung dadurch zu mindern, dass emissionsarme erneuerbare Ressourcen in bestehenden Kohlekraftwerken eingesetzt werden. Eine derartige Strategie ist auf regionaler Ebene evaluiert worden, wobei für die Energiemärkte in Deutschland und mehrerer, an das Versorgungsnetz angeschlossener Nachbarländer wie Dänemark, Luxemburg und die Niederlande ein umfassender Ersatz von Kohle durch Holzpellets in Betracht gezogen wurde.

Um dem deutschen Auftrag zu entsprechen, wurde ein Szenario modelliert, bei dem der multinationale Energiesektor erneuerbare Energien von 32 % auf 60 % bis 2030 steigert, wobei 15 % aus Bioenergie stammen. Die im Szenario G1 untenstehend dargestellte Auswirkung zeigte eine Reduzierung der THG-Emissionen um 44 % im Verhältnis zu den für 2020 simulierten Werten. In Szenario G2 wurde ein alternatives Szenario betrachtet, bei dem der Biostrom konstant bei 6,6 % bleibt und nur Beiträge aus Wind- und Solarenergie erhöht wurden, um das Ziel für erneuerbare Energien zu erreichen. Bei diesem Szenario wurde leicht höhere Emissionsreduzierungen erreicht, die um 46 % unter den für 2020 simulierten Werten lagen.

Der relativ geringe Unterschied der Emissionsprofile, der zwischen den beiden Szenarien festgestellt wurde, ist erwähnenswert. In der vorerwähnten Berichterstattung zur Ökobilanz lag die Kohlenstoffintensität von Strom aus Holzpellets über der von Wind- oder Solarenergie. Es ist üblich, dass in behördlichen Emissionsberichten die THG-Emissionen von Biostrom in der Ökobilanz ausgewiesen werden. Für andere erneuerbare Quellen und Atomenergie werden in der Ökobilanz normalerweise keine Lebenszyklusemissionen ausgewiesen, und diese werden so als emissionsfreie Ressourcen behandelt. Dennoch schneidet das Holzpellet-Szenario fast genauso gut ab, weil es aufgrund seiner 1:1-Substitution Kohle überproportional ersetzt, während andere erneuerbare Energien aufgrund von Änderungen im systemweiten Abruf einen höheren Anteil des Erdgases verdrängen.³⁰ Berücksichtigt man die Lebenszyklusemissionen für Wind- und Solarenergie und dazugehörige Batteriespeicherung, so würden sich in Szenario G2 im Verhältnis zu G1 höhere Emissionswerte ergeben. Um es einfach auszudrücken: Auch wenn der Brennstoff Holzpellets höhere Lebenszyklusemissionen als Wind- und Solartechnologien haben mag, kann die Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus aller Technologien zusätzlich zur Berücksichtigung der Marktauswirkungen diesen Nachteil ganz oder nahezu zunichtemachen.

Angesichts der Tatsache, dass aus Holzpellets gewonnene Elektrizität in der Lage ist, zuverlässig Strom zu liefern, ist diese Art direkter Substitution von Kohle praktikabel. Im Gegensatz dazu ist der Versuch, in höherem Maße auf intermittierende erneuerbare Energien, anstatt auf abrufbare Ressourcen zurückzugreifen, für die Netzbetreiber zunehmend schwierig. Obwohl technisch machbar, ist es letztlich erforderlich, Energie zu speichern, wenn intermittierende erneuerbare Energien in großem Umfang verfügbar sind. Eine derartige Ergänzung um Batteriespeicher bedeutet zusätzliche Kosten und hat wiederum ihre durch den Lebenszyklus bedingten Umweltauswirkungen. Es gibt mehrere, emissionsfreie Vorteile, die es wert sind, betrachtet zu werden. Die Umstellung bestehender Kohlekraftwerke mindert die zuvor erörterten standortbedingten Probleme. Außerdem bedeuten die geringen Kosten für die Umstellung auf Holzpellets, dass Finanzressourcen im Energiesektor reduziert werden können. Am wichtigsten ist vielleicht, dass weniger Probleme mit der Zuverlässigkeit intermittierender erneuerbarer Energien bestehen und weniger Bedarf für die oft kostspielige Batteriespeicherung besteht.



Auswirkungen auf den Strommarkt Japans

Der Strommarkt in Japan wird seit der Stilllegung der Atomkraftwerke nach dem durch den Tsunami verursachten Unfall im Kraftwerk Fukushima Daiichi im Jahr 2011, mit einmaligen Herausforderungen konfrontiert. Vor 2011 hat Japan den Großteil seines Strombedarfs über Atomkraftwerke gedeckt - diese

stellen für ein Land ohne eigene Kohle- und Gasreserven einen strategischen Vermögenswert dar.

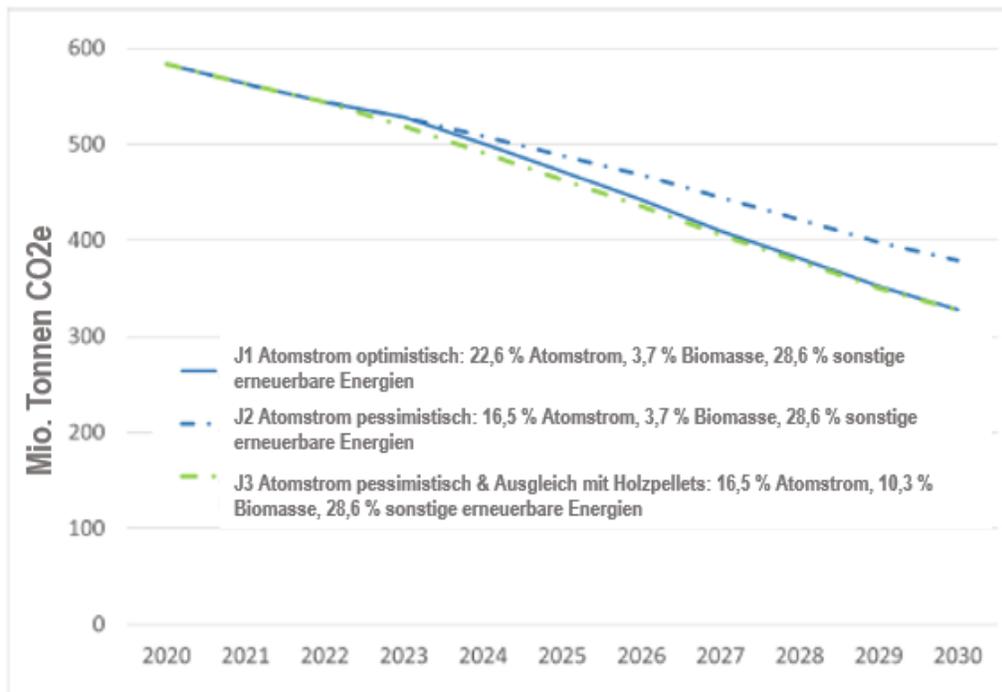
Seit 2011 sind nur wenige AKW wieder angelaufen, während mehrere andere dauerhaft abgeschaltet wurden. Die Energieplaner Japans betrachten die vielen anderen stillgelegten Atomkraftwerke weiterhin als wichtige Komponenten in einer langfristigen Energiestrategie. Diese Reaktoren können in Gruppen eingeteilt werden: werden wahrscheinlich wieder ans Netz gehen; unsicher, ob sie wieder ans Netz gehen; oder unwahrscheinlich, dass sie wieder ans Netz gehen. Diejenigen, für die es unsicher und unwahrscheinlich ist, stehen einer Kombination aus technischer, wirtschaftlicher und öffentlicher Ablehnung gegenüber.

Während das Schicksal des Kernkraftwerksparks Japans weiterhin unsicher ist, ist es nicht wünschenswert und kostspielig, weiterhin von ausländischen Energiequellen abhängig zu sein. Daher ist eine erhebliche Zunahme erneuerbarer Energiequellen, insbesondere von Photovoltaik-Anlagen zu verzeichnen, die dank politischer Anreize rasch zugenommen haben. Der strategische Energieplan Japans (SEP) beinhaltet einen Fahrplan für die in Zukunft geplante Stromressource. Dieser skizziert die gewünschten Beiträge aus einem breit angelegten Spektrum erneuerbarer Energiequellen. Zusätzlich verfolgt Japan das ehrgeizige, aber ungewisse Ziel, ausreichend Atomkraftwerke wieder einzuschalten, um bis 2030 etwa 22 % seiner Stromversorgung zu erzeugen.

Diese Szenarien wurden entwickelt, um zu berücksichtigen, wie die erfolgreiche Wiedereinschaltung in unterschiedlichem Umfang sich auf die THG-Emissionen des japanischen Energiesektors auswirken könnten. Insbesondere wurde die Rolle betrachtet, die Elektrizität auf Basis von Holzpellets bei der Bereitstellung einer „Emissionsabsicherung“ spielen könnte, um geringe Emissionswerte aufrechtzuerhalten, sollten die Wiedereinschaltung nur weniger Atomkraftwerke in Erwägung gezogen werden. Untenstehend werden die THG-Emissionen für jedes der drei Szenarien für den Energiesektor Japans dargestellt.

Im Szenario J1 wird vorausgesetzt, dass Kernkraftwerke erfolgreich wieder eingeschaltet werden und bis 2030 22 % der Energieversorgung übernehmen. Weiterhin sind die in Japans SEP vorgeschriebenen Beiträge umgesetzt worden, um im Szenario J1 auf nationaler Ebene folgenden Energiemix zu erreichen: 9 % Wasserkraft, 7 % Solarenergie, 7 % Windenergie, 4 % Bio-Kraftstoffe, 1 % Geothermie. Die Nettoauswirkungen dieses Szenarios auf THG-Emissionen ergab für 2030 im Verhältnis zu den für 2020 simulierten Werten eine Reduzierung um 44 %. Wichtig ist, dass die Emissionsminderung J1 auf der Annahme basiert, dass ein Großteil der Atomkraftwerke Japans erfolgreich wiedereingeschaltet werden kann. Da die Wiedereinschaltung mehrerer Kraftwerke als ungewiss eingestuft wird, kann man das jedoch nicht voraussetzen.³¹

In Szenario J2 wurde die relative Zunahme der Emissionen aus dem Energiesektor dargestellt, sollten diese als ungewiss eingestuft Atomkraftwerke nicht wiedereingeschaltet werden. Anstatt einer Reduzierung um 44 % wird nur eine Reduzierung der THG um 35 % erreicht. In Szenario J3 wird der Einsatz von Energie aus Holzpellets als „Kohlenstoff-Absicherung“ simuliert, sollten diese Atomkraftwerke der pessimistischen Annahme aus Szenario J2 folgen. In Szenario J3 wird die gleiche Kohlenstoff-Entwicklung wie in dem optimistischen Atomszenario J1 beibehalten, wobei mehrere der Kohlekraftwerke Japans auf die Nutzung von Holzpellets umgestellt werden, womit der Gesamtbeitrag von Biobrennstoff zum Energiesektor von 3,7 % auf 10,3 % steigt.



Die Analyse der Unsicherheiten der Atomindustrie Japans wurde auf Ebene der einzelnen Kraftwerke durchgeführt, wobei betrachtet wurde, für welche einzelnen Kraftwerke es wahrscheinlich, unsicher oder unwahrscheinlich ist, dass sie den Betrieb wieder aufnehmen. Die Ergebnisse werden sich dramatisch auf das nationale CO₂-Profil Japans im Verhältnis zu den auf internationaler Ebene eingegangenen Verpflichtungen auswirken, so dass eine Notfallplanung für die Auswirkungen der THG-Emissionen erforderlich ist. Aus Ergebnissen von Modellberechnungen geht hervor, dass der Ersatz von Kohle durch Holzpellets als Brennstoff im obenstehend simulierten Umfang (J3) Japan erheblich gegen die Zunahme von Emissionen absichern kann. Diese Strategie stellt einen Ansatz dar, wie Japan seine vorgeschlagenen CO₂-Ziele einhalten kann, sollten problematische Kernreaktoren nicht wiedereingeschaltet werden können.

Schlussfolgerung

Insgesamt zeigt sich, dass die Energieerzeugung auf Basis von Holzpellets eine zuverlässige und abrufbare Quelle erneuerbarer Energie ist und dazu beiträgt, Probleme intermittierender Energieerzeugung aus Solar- und Windanlagen zu korrigieren. Im Vergleich zu, der aus Kohle und herkömmlichem Erdgas gewonnenen Energie, ist Elektrizität, die aus Biomasse auf Basis von Holzpellets gewonnen wird, eine nachhaltige Energiequelle, sofern die Wälder, die das Holz erzeugen, nachhaltig bewirtschaftet werden. In der Vergangenheit haben Analysen gezeigt, dass diese im Vergleich zu Kohle und herkömmlichem Erdgas zu wesentlich weniger THG-Emissionen pro kWh, nämlich 87 %, bzw. 71 % weniger führt. Pro 1 Mio. US\$, die in biomasse-befeuerte Kraft-Wärme-Kopplungskraftwerke investiert werden, fallen ganze 658.000 kg weniger CO₂e-Emissionen an.

Für den Energiesektor des Vereinigten Königreichs, Deutschlands und Japans wurde das Potenzial der auf Holzpellet-Biomasse basierenden Energie untersucht, THG-Emissionen zu verdrängen. Kohlenstoffarme Energie auf Holzbasis kann eine wichtige adaptive Technologie darstellen, wenn es darum geht, im Energiesektoren mehr Kohlenstoffreduzierung zu erreichen. Ebenfalls hat sich ergeben, dass der Einsatz von Holzpellets, um fossile Brennstoffe zu verdrängen, für Länder, die THG-Emissionen weiter reduzieren wollen, ein wertvolles Mittel darstellen kann.

Die positiven Leistungsattribute von Strom aus Holzpellets kann auch den Umfang erweitern, in dem Solar- und Windenergie-Infrastrukturen eingeführt werden können. Nachhaltig auf Basis von Holzpellets

produzierte Biomasse kann auf Dauer die Schwankungen in der Stromversorgung ausgleichen, die bei Wind, Solar und anderen intermittierenden Formen erneuerbarer Energien auftreten. Dieser Ausgleich ist maßgeblich, damit Systembetreiber Versorgungsunterbrechungen vorbeugen.

Die umweltbedingten Vorteile der Strom- und Wärmeproduktion aus Biomasse auf Basis von Holzpellets anstatt aus Kohle und Erdgas sind überaus erheblich, wenn das für die Erzeugung der Holzpellets verwendete Holz aus Sekundärmaterial besteht und nachhaltig aus Wirtschaftswäldern bezogen wird. Die THG-Emissionen können signifikant gesenkt werden, wenn wirkungsvolle Verordnungen, beste Praxis und Audits von Drittparteien vorhanden sind, obwohl die Stromproduktion aus Biomasse auf Basis von Holzpellets sehr umstritten sein kann, wenn die Wälder nicht nachhaltig bewirtschaftet werden.

Während die Wälder in den USA aufgrund besserer Nachhaltigkeitsmethoden regelmäßiges Wachstum verzeichnet haben, kann die Stromproduktion auf Basis von Biomasse nicht kategorisch als umweltfreundlich bezeichnet werden. Dieses Forschungspapier konzentriert sich jedoch nicht auf Bioenergie-Lieferketten aus fragwürdiger Nachhaltigkeit. Daher sind die Vorteile der Biomasse einzelfallspezifisch. Ziel dieser Studie war, zu analysieren, wie nachhaltig beschaffte Holzpellets im direkten Vergleich zu Kohle und Erdgas abschneiden bzw. ob und in welchem Fall nachhaltige Holzpellets Emissionen vorteilhaft reduzieren. Regierung und Industrie müssen weiterhin dringend in Energieformen investieren, die zu einem zuverlässigeren und kohlenstoffneutralen Netz führen.

Anlage: Erörterung von Kohlenstoffneutralität und Ökobilanzpraktiken

Bei der Bewertung der Kohlenstoffintensität für die Bioenergie-Lieferkette ist es maßgeblich, ob der biogene Kohlenstoffstrom der Rohstoffversorgung nachweislich kohlenstoffneutral ist. Drei Voraussetzungen haben dazu beigetragen, uns in unserer Annahme der Kohlenstoffneutralität zu bestätigen: A) im geografischen Untersuchungsbereich nehmen die Netto-Kohlenstoffspeicher in den Forsten zu, B) Rohstoffe werden aus Rückständen aus Sägewerken und Nebenprodukten bei der Holzernte gewonnen und C) die Biomasse-Produktion stammt nicht aus der Umwandlung von Forstflächen in andere Nutzungen mit nachteiligen ökologischen und emissionsrelevanten Konsequenzen. In Bezug auf die Voraussetzung A gehört der Südosten der USA zu den Regionen, in denen der Gesamtkohlenstoffspeicher der Waldbiomasse in den letzten Jahrzehnten nachweislich zunimmt. Betrachtet man regionale und staatliche Forste einschließlich aller Arten Eigentümer, so wird ersichtlich: Fläche, Volumen und Kohlenstoffspeicher in Forsten haben jährlich um einen stabilen Prozentsatz zugenommen.^{13,24} Zu Voraussetzung B setzt die durch Dritte geprüfte nachhaltige Beschaffung von Enviva voraus, dass die Rohstoffe zu bestimmten Kategorien gehören; Restholz oder Abfälle, die von der Holzindustrie nicht genutzt werden.²⁵ Dazu gehören normalerweise Rückstände aus Sägewerken, Baumkronen, Zweige sowie ganze Bäume, die zu klein oder von zu schlechter Qualität sind, um in anderen Bereichen der Industrie forstwirtschaftlicher Erzeugnisse verwendet zu werden. Bezüglich des Kriteriums C legt die EU-Richtlinie für Erneuerbare Energien (RED II) Kriterien für Rohstoffe zur Herstellung von Biokraftstoffen, flüssigen Biobrennstoffen und Biomasse mit besonderem Augenmerk auf eine Änderung der Landnutzung fest.⁹ Laut dieser Richtlinie sind Naturgebiete zu schützen, bewirtschaftete Wälder zu regenerieren und eine langfristige Produktionskapazität und gesunde Wälder sind aufrechtzuerhalten und zu verbessern.^{10,11} Beispielsweise kann das Holz, das zu Holzpellets verarbeitet wird, nicht aus Waldflächen stammen, die für einen anderen Zweck als zur Aufforstung vorgesehen sind. Diese Regeln gelten auch für europäische Importeure von Holzpellettlieferanten in den USA, wenn die Holzpellets als nachhaltige Biomasse gekennzeichnet werden sollen.

Wie vorstehend erörtert ist die Berücksichtigung des Netto-Kohlenstoffstroms biogener Ressourcen für zuverlässige Planung und Regulierung der Treibhausgasemissionen unbedingt erforderlich, für welche eine objektive, kritische Forschung maßgeblich ist. Forschung, die allgemein kritisch zu Biomasse steht, hat jedoch zu anhaltender Verwirrung in der breiten Presse geführt und Entscheidungsträger hinsichtlich der Klimavorteile nachhaltiger Forstwirtschaft und bestätigter Kohlenstoffneutralität in die Irre geführt. Eine derartige Behauptung lautet, dass Strom aus Biomasse mehr Kohlenstoff ausstößt als Kohle. Diese Behauptung gilt selektiv für den Verbrennungsprozess an sich. Aufgrund der Chemie von Brennstoffen und Verbrennung kann die Wärmeeffizienz der Kohleverbrennung besser sein als die aus Biomasseverbrennung, insbesondere, wenn Grünholzhackschnitzel anstatt der hier geprüften trockenen Holzpellets verwendet werden und insbesondere, wenn keine Rückgewinnung der Abwärme erfolgt (d. h. KWK). Das während der Verbrennung in Kraftwerken freigesetzte CO₂ sollte jedoch nicht mit der CO₂-Gesamtauswirkung des Systems zusammengefasst werden, wenn eine ordnungsgemäße Berücksichtigung des Lebenszyklus erfolgt. Die geringere Wärmeeffizienz von Biomasse ist nur eine Komponente der Gesamtkohlenstoffintensität und spiegelt nicht die Netto-Kohlenstoffintensität des Brennstoffes wider. Wie in dieser Studie nachgewiesen, führt der Ersatz von Kohle durch Holzpellets mit geringer Kohlenstoffintensität zu erheblicher Kohlenstoffminderung. Gegner argumentieren auch ganz allgemein, dass das Verbrennen von Biomasse zur Erzeugung von Strom kurzfristig die CO₂-Werte erhöhen und zu einer Kohlenstoffschuld führen kann. Sie geben zu bedenken, dass sich diese Zunahme von CO₂-Emissionen in die Atmosphäre direkt nachteilig auf die Erderwärmung auswirkt. Es ist wichtig zu beachten, dass die globalen Temperaturen relativ unempfindlich gegenüber kurzfristigen Veränderungen der CO₂-Emissionen sind, da sie eine Funktion der langfristigen kumulativen CO₂-Emissionen sind.³²

Im Folgenden werden Fragen zum Zeitpunkt der Kohlenstoffaufnahme und -emissionen (Kohlenstoffschuld) und zu den relativen langfristigen Auswirkungen von Holzpellets mit geringer

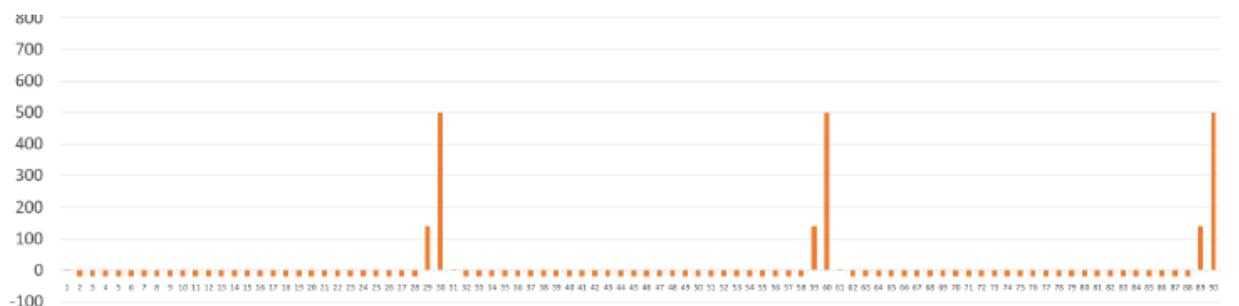
Kohlenstoffintensität gegenüber der Kohleverstromung gestellt. Dazu wurde eine einfache, kohlenstoffneutrale Produktion einer metrischen Tonne Holzpellet-Brennstoff geprüft, die sich über einen Zyklus von 30 Jahren wiederholt, wobei von den Annahmen in nachstehender Tabelle ausgegangen wurde.

	kg C /Tonne	
	Pellet	C-Quelle
Anpflanzen	2,54	Externer Brennstoff
Durchschnittliches Jahreswachstum (29 Jahre)	-20,85	Interner C-Zyklus
Ernte und Transport	6,12	Externer Brennstoff
Trocknen	104,74	Interner C-Zyklus
Verarbeitung und Versand	49,00	Externer Brennstoff
Verbrennung	500,00	Interner C-Zyklus
Gesamtemissionen interner C-Zyklus	604,74	Trocknen & Verbrennen
Gesamtkohlenstoffaufnahme während Wachstum	-604,74	29 Jahre Wachstum
Summe externer aus Brennstoff stammenden C-Emissionen	57,66	Anpflanzen. Ernte, Transport

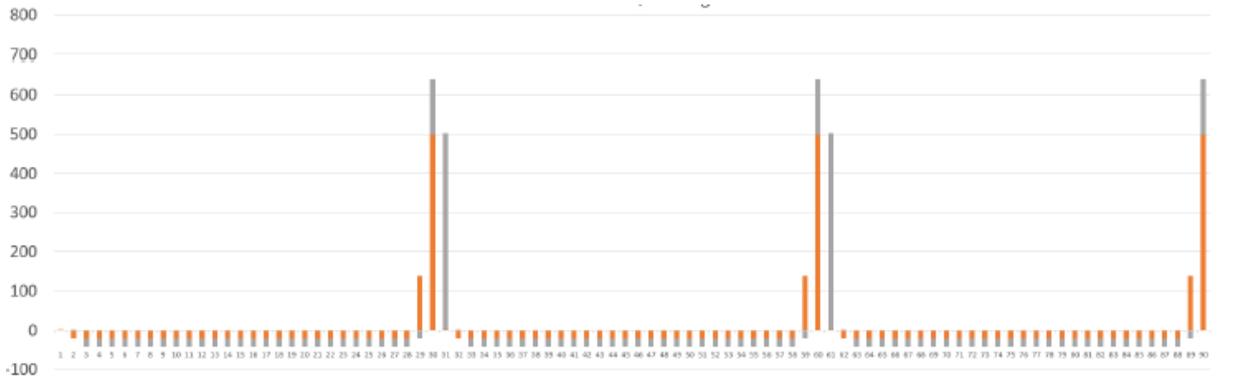
Aus Abbildung A4-1a geht hervor, dass die Forstanpflanzung im Jahr 1 für geringe Emissionen im Lebenszyklus verantwortlich ist. Es wird lineares Wachstum in den Jahren 2 - 29 vorausgesetzt und die Kohlenstoffaufnahme wird als negativer Wert dargestellt. Im Jahr 29 sind die Kohlenstoffemissionen auf Ernte, Verarbeitung und Transport (externe Brennstoffquellen) und das Trocknen der Biomasse (interner Kohlenstoffzyklus) zurückzuführen. Im Jahr 30 wird der Holzpellet-Brennstoff verbraucht und setzt den Kohlenstoff in den Pellets frei.

Die Gesamtkohlenstoffaufnahme entspricht den beim Trocknen der Biomasse und bei Verbrennung freigesetzten Emissionen (kohlenstoffneutral). Der Zyklus wiederholt sich und beginnt in den Jahren 31 und 61. Selbstverständlich muss ein Lieferant von Biobrennstoff für wiederholte Brennstofflieferungen seine Rohstoffe von verschiedenen Standorten beziehen. In Abbildung A4-1b wird der Kohlenstoffstrom in Verbindung mit einem zweiten Beschaffungsstandort mit grauen Balken dargestellt, wobei die Anpflanzung im Jahr 2 und die Verbrennung des Brennstoffes in Jahr 31 erfolgt. Abbildung A4-1c stellt die kontinuierliche Lieferung von 30 Beschaffungsstandorten dar und der jährliche netto Gesamtkohlenstoffstrom wird mit stabilen Emissionen in Höhe von 58 kg C/Tonne ab dem Jahr 30 grün dargestellt.

A4-1a kg C/q/Tonne Holzpelletverbrennung über 90 Jahre
1 Beschaffungsstandort, lineares Wachstum



A4-1b 2 Beschaffungsstandorte, lineares Wachstum



A4-1c 30 Beschaffungsstandorte, lineares Wachstum

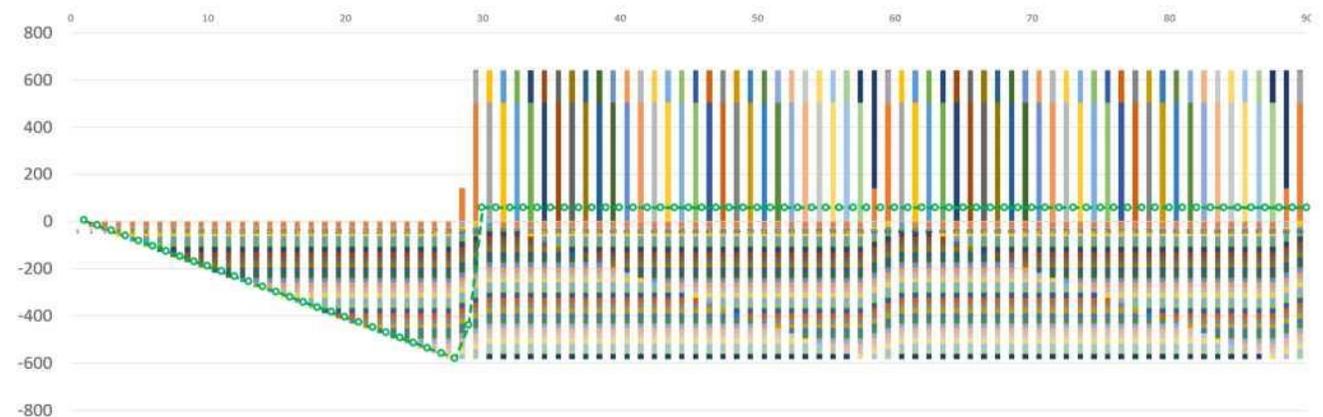
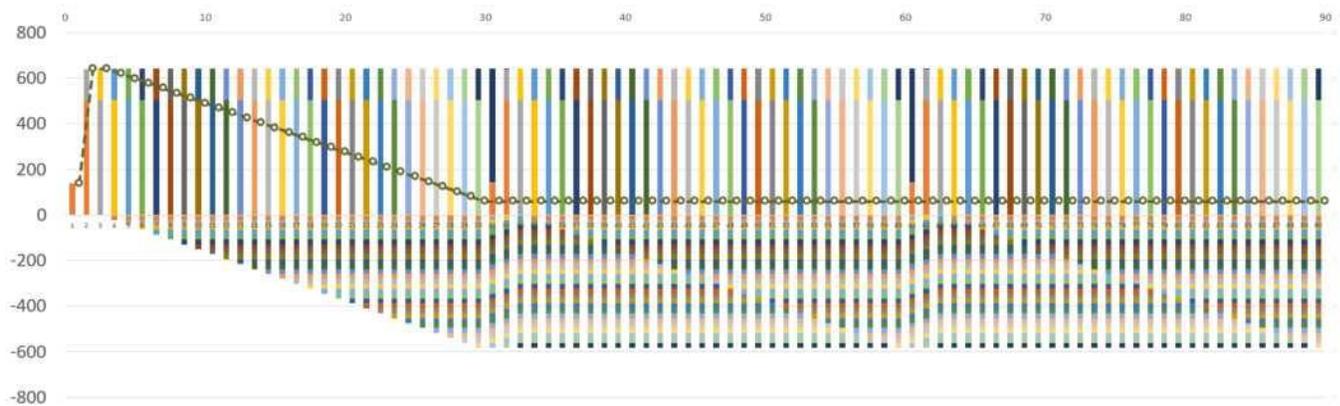


Abbildung A4-1a, b, c. Kohlenstofffluss für ein regeneratives Brennstoffsystem mit einer Laufzeit von dreißig Jahren, bezogen von einem Beschaffungsstandort (oben - a), zwei Beschaffungsstandorten (Mitte - b) und 30 Beschaffungsstandorten (unten - c), wobei die jährlichen Gesamtemissionen in grün dargestellt sind. Es wird von einem linearen Forstwachstum über 29 Jahre ausgegangen, wobei Rohstoffproduktion und Verarbeitung am Ende von Jahr 29 und Brennstoffverbrennung Anfang Jahr 30 erfolgen.

Während Boundless sich nicht für einen derartigen Ansatz ausspricht, werden in Abbildung A4-2 die Folgen eines Ökobilanzierungsansatzes von Kohlenstoffschulden dargestellt, wobei die Kohlenstoffaufnahme von Biomasse-Brennstoffen während der Wachstumsphase nicht angerechnet wird. Wichtig ist, dass diese unterschiedlichen Bilanzierungspraktiken auf das gleiche 30-jährige Produktionsszenario wie in A4-1 angewandt werden, **sodass die tatsächlichen weltweiten Emissionsfolgen in beiden Fällen gleich sind**. In Abbildung A4-1 rechnet die standardmäßige Bilanzierung der Industrie 100 % der biogenen Kohlenstoffaufnahme dem Biomassebrennstoff vor der Verbrennung an. Mit anderen Worten gleicht die gesamte Kohlenstoffaufnahme während der Wachstumsphase den gleichen Kohlenstoff aus, der bei der Verbrennung freigesetzt wird. In Abbildung A4-2a wird die biogene Kohlenstoffaufnahme vor Verbrennung nicht gutgeschrieben. Kohlenstoff wird bei der Produktion von Biomasse, ihrer Verarbeitung und Verbrennung freigesetzt. Die Anrechnung von Kohlenstoffgutschriften wird entsprechend dem künftigen regenerativen Forstwachstum verzögert. Die Nettoemissionen dieses Systems werden durch die braune Linie in Abbildung A4-2a dargestellt und können mit der grünen Linie in Abbildung A4-1c (unten) verglichen werden. **Unabhängig von der Wahl der Ökobilanzierung ergeben sich dieselben jährlichen Emissionen von 58 kg/Tonne unter stationären Bedingungen**, d.h. dieselbe Gleichgewichts-Emissionsrate aus der Sicht des Ökobilanzbuchhalters. Die gleiche Gleichgewichts-Emissionsrate wird für das 30-Beschaffungssystem aufgezeigt, wenn regeneratives Wachstum und Brennstoffproduktion als stationärer Vorgang erfolgen und wird mit der schwarzen Linie in Abbildung A4-2b (unten) dargestellt.

A4-2a kg C_{eq}/Tonne Holzpelletverbrennung über 90 Jahre
 30 Beschaffungsstandorte, lineares Wachstum, verzögerte Anrechnung der Gutschrift der Kohlenstoffaufnahme



A4-2b 30 Beschaffungsstandorte, lineares Wachstum, kontinuierlich stationär

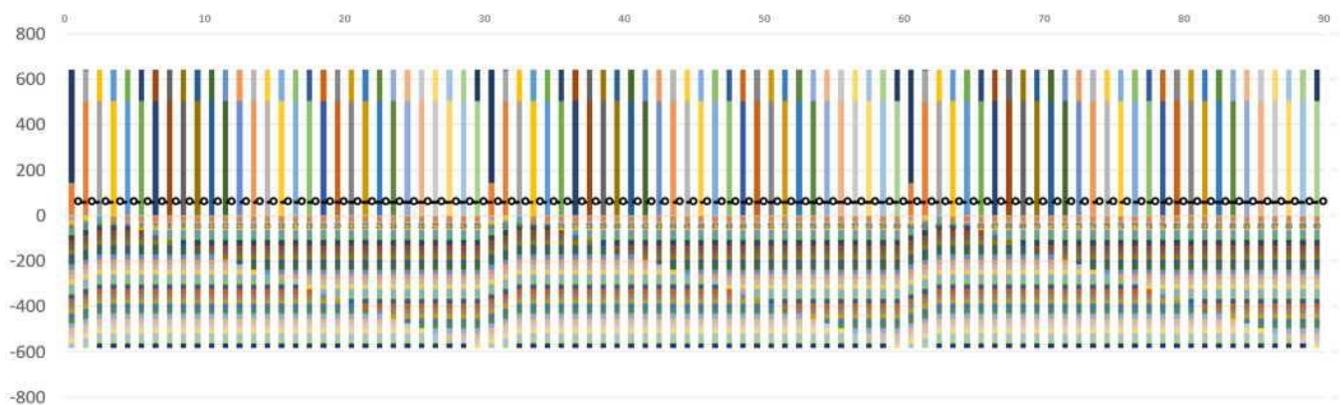


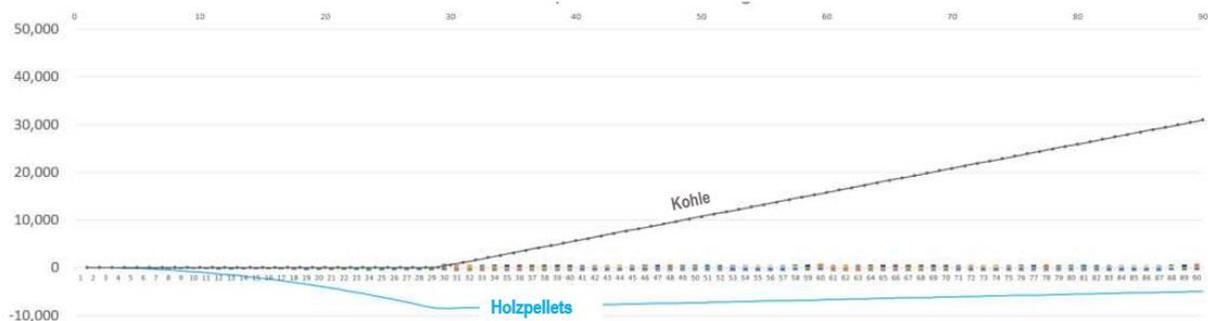
Abbildung A4-2a, b. Kohlenstoffemissionen werden für ein einfaches, dreißigjähriges regeneratives Brennstoffsystem geprüft, bei dem von einem linearen Forstwachstum über 29 Jahre ausgegangen wird, wobei Rohstoffproduktion und Verarbeitung am Ende von Jahr 29 und Brennstoffverbrennung Anfang Jahr 30 erfolgen. Oben (a) wird keine biogene Kohlenstoffaufnahme vor Verbrennung gutgeschrieben, wodurch die Anrechnung von Kohlenstoffgutschriften verzögert wird, um künftigem regenerativem Wachstum zu entsprechen. Im Gegensatz dazu werden unten (b) Nettoemissionen für ein regeneratives System mit 30-jähriger Beschaffung bei kontinuierlich stationären Voraussetzungen dargestellt.

Aus der Sicht der Ökobilanzierung bietet die Ablehnung der Vereinbarung, die Kohlenstoffaufnahme während des Wachstums der Biomasse anzurechnen (statt eine Kohlenstoffschuld zum Zeitpunkt der Verbrennung zuzuweisen), keinen wirklichen Emissionsnutzen, beeinträchtigt potenziell jedoch praktische Emissionsvorschriften. Die auf Ökobilanzen basierende Regulierung von Bioenergie-THG ist oft kompliziert, insbesondere, wenn Ausgleichs aus physisch unterschiedlichen Systemen integriert werden (siehe (Kaufman, et al. 2010)³³ zur Erörterung der damit verbundenen Variabilität der Ökobilanzierungspraktiken für die regulatorische Bioenergiebilanzierung). Dass der in der Biomasse physikalisch gebundene Kohlenstoff während des photosynthetischen Wachstums der Atmosphäre entzogen wurde, ist eine eindeutige und logische Grundlage für die Anrechnung des bei der Verbrennung freigesetzten Kohlenstoffs. Der Kohlenstoff-Schulden-Ansatz bei der Ökobilanzierung würde anscheinend eine nicht-wörtliche Zuweisung von Kohlenstoff-Ausgleichszahlungen erfordern, die als Ergebnis des Wachstums einer anderen Pflanze in einer anderen zukünftigen Landschaft entstehen. Ein solches System würde eine verlässliche THG-Regulierung untergraben und beinhaltet das offensichtliche Potenzial für eine nicht praktikierbare, ungenaue und nicht überprüfbare

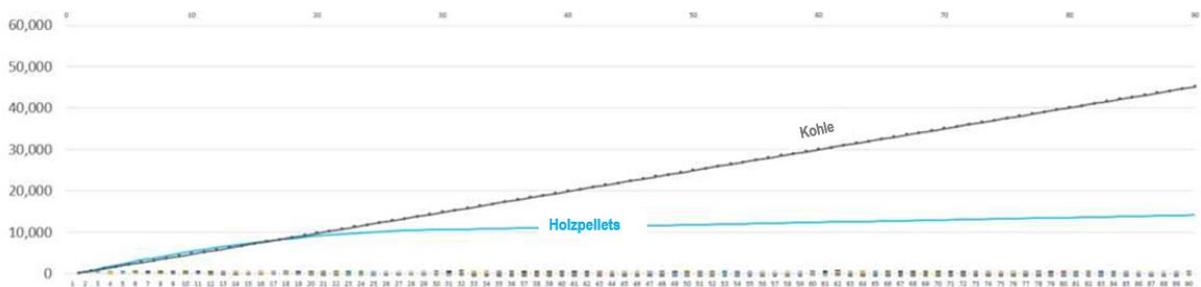
Kohlenstoffbilanzierung. Abgesehen davon, dass es nicht logisch und unmöglich ist, schafft die fehlende Anrechnung der Kohlenstoffaufnahme während der Wachstumsphase von Biomasse offensichtlich auch einen Negativanreiz für kohlenstoffarme regenerative Brennstoffsysteme. Während die Wahl der Ökobilanzierung sich auf die eigentlichen Emissionen nicht auswirkt, hat sie dennoch das Potenzial, Negativanreize für kohlenstoffarme Brennstofflieferungen zu schaffen, indem Zahlungen oder Anreize als Belohnung für reduzierte Emissionen zu einem früheren Zeitpunkt des Lebenszyklus herausgezögert werden.

Abschließend wird die Frage angesprochen, ob nachhaltig bewirtschaftete Biomasse gegenüber Kohle zu Emissionsvorteilen führt. Basierend auf der vorstehenden Analyse stellt Abbildung A-43 Vergleiche zwischen kohlenstoffarmem Holzpellet-Brennstoff mit einer entsprechenden Menge Kohlestrom dar. An dieser Stelle wird auf den bereits zu einem früheren Zeitpunkt angesprochenen Punkt hingewiesen, dass davon ausgegangen wird, dass Kohleverbrennung um 5 % wärmeeffizienter als die Verbrennung von Holzpellets ist. Vorgelagerte Emissionen des Kohleabbaus und -transports werden mit 15 % der Kohleemissionen während des gesamten Lebenszyklus angesetzt.

Kumulativer Kohlenstoffstrom über 90 Jahre, Holzpellets verglichen mit Kohle
A4-3a 100 % Anrechnung der Kohlenstoffaufnahme für Biomasse-Wachstum



A4-3b 0 % Anrechnung der Kohlenstoffaufnahme für Biomasse-Wachstum



A4-3c Kohlenstoffneutral stationär

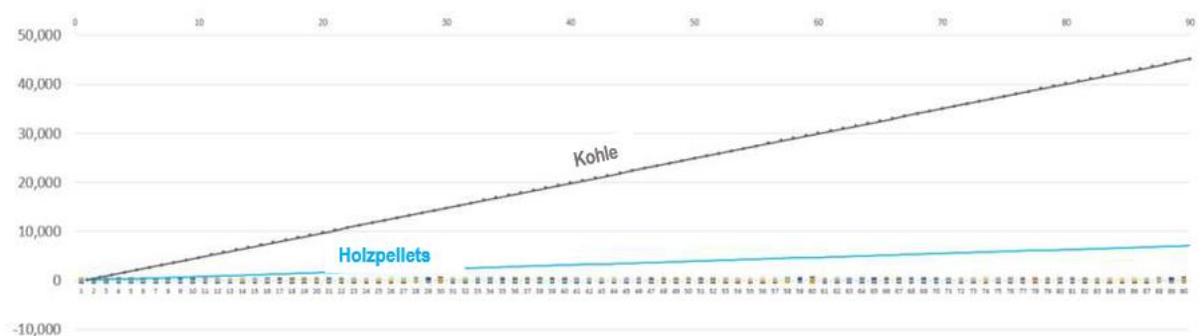


Abbildung A4-3 vergleicht die langfristigen kumulativen Emissionen für Holzpellets mit Kohle, wobei die Kohlenstoffgutschriften aus dem Forstwachstum auf Holzpellets unter Verwendung von drei Bilanzierungsansätzen angewandt werden: **alle vorherigen** Kohlenstoffaufnahmen, die während des Forstwachstums gutgeschrieben wurden (a - oben), **keine vorherige** Kohlenstoffaufnahme während des Forstwachstums (b - Mitte) und kohlenstoffneutrales **stationäres** System (c - unten).

In allen drei in Abbildung A4-3 dargestellten Fällen sind die tatsächlichen Emissionen identisch, nur die Bilanzierung unterscheidet sich. In jedem Fall liegen die langfristigen Emissionen für Holzpellet-Brennstoff ganz erheblich unter denen für Kohle. In A4-3b (Mitte) führt die geringfügig höhere Wärmeeffizienz zu weniger Emissionen im Ausgangspunkt, wobei dieser Vorteil mit der Anrechnung des Kohlenstoffvorteils aus anschließendem Forstwachstum kontinuierlich rückläufig ist. Aktuelle Industriepraxis, die den tatsächlichen Kohlenstoffstrom aus regenerativen Bioenergiesystemen (a oder c) genauer darstellt, entspricht einer Bilanzierungspraxis, die den dringenden Klimaproblemen eher entspricht. Im Falle langfristiger Wirtschaftswälder, wie denen im Südosten der USA, wird der Vergleich von Holzpellets mit Kohle vermutlich am besten durch stabile Bedingungen dargestellt, die Abbildung A4-3c oben entsprechen.

- ¹ International Energy Agency. 2018. *Renewables 2018*. <https://www.iea.org/reports/renewables-2018>
- ² Cision PR Newswire. 2019. *Wood Pellet Market Size Worth \$15.47 Billion by 2025 | CAGR: 9.2%: Grand View Research, Inc.* <https://www.prnewswire.com/news-releases/wood-pellet-market-size-worth-15-47-billion-by-2025-cagr-9-2-grand-view-research-inc--842917080.html>
- ³ Enviva. n.d. *Sustainability*. <https://www.envivabiomass.com/sustainability/>
- ⁴ Die Nutzung von Holzpellets zur Stromproduktion gehört zu den beiden wichtigsten Nutzungen von Holzpellets weltweit. Weltweit werden Holzpellets auch in großen Mengen für thermische Zwecke genutzt - in erster Linie für das Beheizen kommerzieller/institutioneller Gebäude und Wohngebäude.
- ⁵ Dwivedi, P, R Bailis, T Bush, and M Marinescu. 2011. "Quantifying GWI of wood pellet production in the southern United States and its subsequent utilization for electricity production in the Netherlands/Florida." *Bioenergy Research* 180-192.
- ⁶ Röder, M., C. Whittaker, and P. Thornley. 2015. "How certain are greenhouse gas reductions from bioenergy? Life cycle assessment and uncertainty analysis of wood pellet-to-electricity supply chains from forest residues." *Biomass and Bioenergy* 79: 50-63. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.03.030>.
- ⁷ Sahoo, K., E.M. Bilek, S. Mani. 2018. "Techno-economical and environmental assessments of storing woodchips and pellets for bioenergy applications." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 98: 27-39.
- ⁸ United Nations. n.d. *About the Sustainable Development Goals* <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>
- ⁹ European Commission. 2019a. *Renewable Energy - Recast to 2030 (RED II)*. 07 23. <https://ec.europa.eu/jrc/en/jec/renewable-energy-recast-2030-red-ii>.
- ¹⁰ European Commission. 2019b. *Sustainability criteria for biofuels specified*. 03 13. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/MEMO_19_1656
- ¹¹ Official Journal of the European Union. 2018. *Document 32018L2001*. 12 21. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L..2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC>.
- ¹² Chatham House. 2017. *Woody Biomass for Power and Heat: Impacts on the Global Climate*. <https://www.chathamhouse.org/publication/woody-biomass-power-and-heat-impacts-global-climate#>
- ¹³ USDA Forest Service. 2019. *Forests of North Carolina, 2018*. Resource Update (RU), Asheville; NC: Forest Service. doi:<https://doi.org/10.2737/FS-RU-225>.
- ¹⁴ USDA Forest Service. 2017. *The Dawn of Sustainable Forestry in the South*. https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/gtr/gtr_srs221_.pdf
- ¹⁵ NAFO Alliance. n.d. *Working Forests*. <https://nafoalliance.org/issues/working-forests/>
- ¹⁶ Michigan State University. 2014. *Timber harvest methods*. <https://www.canr.msu.edu/news/timber-harvest-methods>
- ¹⁷ Enviva. n.d. *Track & Trace*®. <https://www.envivabiomass.com/sustainability/responsible-sourcing/track-trace/>
- ¹⁸ Dogwood Alliance. 2019. *Enviva: Caught in the Act*. <https://www.dogwoodalliance.org/2019/06/caught-in-the-act/>
- ¹⁹ University of Florida IFAS Extension. n.d. *Forest Certification Programs*. <http://www.sfrc.ufl.edu/Extension/florida-forestry-information/planning-and-assistance/forest-certification-programs.html>
- ²⁰ Enviva. n.d. *Third-Party Sustainability Certifications*. <https://www.envivabiomass.com/sustainability/responsible-sourcing/third-party-certifications/>
- ²¹ USDA Forest Service Southern Research Project. n.d. *Chapter 6 Forest Ownership Dynamics of Southern Forests* <https://www.srs.fs.usda.gov/futures/technical-report/06.html>
- ²² Sustainable Biomass Program. n.d. *SBP's Purpose and Strategy*. <https://sbp-cert.org/about-us/sbps-purpose/>
- ²³ Galik, C.S. and Abt, R.C. (2016), *Sustainability guidelines and forest market response: an assessment of European Union pellet demand in the southeastern United States*. *GCB Bioenergy*, 8: 658-669. doi:10.1111/gcbb.12273
- ²⁴ Johnston, J. M., and D. A. Crossley Jr. 2002. "Forest ecosystem recovery in the southeast US: soil ecology as an essential component of ecosystem management." *Forest Ecology and Management* 155 (1-3): 187-203. doi:[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00558-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00558-8).
- ²⁵ Enviva Partners. n.d. *Enviva's Responsible Wood Supply Program*. <http://www.envivabiomass.com/sustainability/track-and-trace-3/enviva-responsible-wood-supply-program/>.
- ²⁶ JuiceBox. 2018. *Clean Energy Strategy & Decision Support Documentation*. Paul J. Meier, PE, PhD. Version 2.7. 08

01. https://juiceboxcleanenergy-my.sharepoint.com/:w:/g/personal/paul_meier_juiceboxcleanenergy_onmicrosoft.com/EQ-zRl1zs-1JoRvnMmhNpzABpCAW9FTIK3-rJ4xYviJsSg?rttime=SJQQXjKj10g.

²⁷ Global Energy Observatory, Google, KTH Royal Institute of Technology in Stockholm, Enipedia, World Resources Institute. 2018. "Global Power Plant Database." Published on Resource Watch and Google Earth Engine. <http://resourcewatch.org/> <https://earthengine.google.com/>.

²⁸ International Energy Agency. 2020. "Electricity statistics." 01 20. <https://www.iea.org/subscribe-to-data-services/electricity-statistics>.

²⁹ All U.K. statistics from the International Energy Agency for 2018. <https://www.iea.org/countries>

³⁰ Außerdem führte die angenommene Umstellung von effizienteren Kohlekraftwerken auf den Brennstoff Holzpellets indirekt dazu, dass man sich mehr auf kleinere, weniger effiziente Kohlekraftwerke stützt. Während ein derartiges Feedback bei der Modellierung berücksichtigt wurde, trifft das nicht unbedingt bei der tatsächlichen Umsetzung mit einer Politik zu, die darauf ausgelegt ist, diese Wirkung zu vermeiden.

³¹ FEPC. n.d. *Nuclear Power Plants in Japan*. https://www.fepec.or.jp/english/nuclear/power_generation/plants/index.html

³² IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

³³ Kaufman, A.S., P.J. Meier, J.C. Sinistore, and D.J. Reinemann. 2010. "Applying life-cycle assessment to low carbon fuel standards—How allocation choices influence carbon intensity for renewable transportation fuels." *Energy Policy* 38 (9): 5229-5241. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.008>.