

## 2. Stroh als Energieträger

Stroh ist ein Nebenprodukt, das beim Anbau von landwirtschaftlichen Nutzpflanzen, hauptsächlich Getreide, anfällt. Stroh von Raps und anderen Samenpflanzen macht ebenfalls einen Teil der Gesamtproduktion aus. Die Wahl der Anbaupflanzen in der Landwirtschaft - und damit der Umfang der Strohproduktion - hängt in erster Linie von fachlichen, anbautechnischen und wirtschaftlichen Faktoren ab, die die Disponierung der gesamten landwirtschaftlich nutzbaren Fläche beeinflussen.

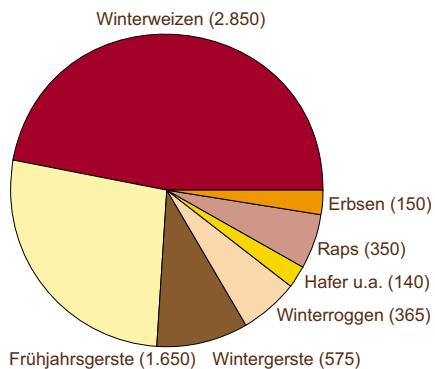


Schaubild 3: Strohernte 1996. Von den insgesamt 6 Millionen Tonnen bergbaren Strohs entfallen über 80% auf Weizen und Gerste (30). Zahlen in 1000 Tonnen.

Einfluß auf die jährliche Strohproduktion haben die von der Agrarpolitik der EU festgelegten Rahmenbedingungen, z.B. Getreidepreisentwicklung und Brachlegung. Die Strohqualität und die Menge, die geborgen werden kann, hängen außerdem von den Witterungsbedingungen während der Wachstumsperiode und der Bergung ab.

1996 betrug die Getreideanbaufläche in Dänemark 1,55 Mill. Hektar (25). Der Getreideertrag lag bei 9,17 Mill. Tonnen Kerne, die Strohmenge machte 6 Mill. Tonnen aus. Die Strohproduktion in einem Jahr mit einer Durchschnittsernte wird auf 6,3 Mill. Tonnen veranschlagt, kann aber durch die klimatischen Bedingungen in der Wachstums- und Bergungsperiode um bis zu 30% schwanken.

### Verwendung des Strohs

Von der gesamten Strohproduktion wird nur ein kleinerer Teil für Energiezwecke genutzt. Ein Großteil bleibt im landwirtschaftlichen Produktionskreislauf, z.B. als Streu in Ställen und Futter. Eine erhebliche Menge Stroh wird außerdem für Heizzwecke, Getreidetrocknung u.a. in

der Landwirtschaft verwendet. Darüber hinaus wird eine vertraglich festgelegte Menge Stroh zur Energieerzeugung an Fernwärmewerke und Kraftwerke abgesetzt. Das jetzt noch übrige Stroh wird in den meisten Fällen gehäckselt, untergepflügt und dient dadurch der Bodenverbesserung. Es besteht also ein gewisser Strohüberschuß, der - unter Berücksichtigung der jährlichen, wetterbedingten Schwankungen - eine potentielle Brennstoffreserve darstellt.

1996 betrug die gesamte Strohernte 6 Mill. Tonnen, davon wurden ca. 15% für Energiezwecke genutzt. Es wird damit gerechnet, daß der Strohverbrauch in Kraftwerken und Heizkraftwerken 1997-98 auf ca. 400.000 Tonnen steigt.

Im Rahmen der Biomasse-Vereinbarung vom 14. Juni 1993 führten die Energieversorgungsunternehmen EL-SAM und ELKRAFT 1994 in Zusammenarbeit mit dem Zentralverband der dänischen Landwirtschaftsvereine (De danske Landboforeninger), Experten aus Forschungseinrichtungen sowie der dänischen Energiebehörde eine Untersuchung der jetzigen und künftig zu erwartenden Strohmengen durch (6). Damit sollte eine Grundlage geschaffen werden, um abschätzen zu können, welche Strohmengen künftig für einen Ausbau der strohbasiereten Strom- und Wärmeerzeugung in Dänemark zur Verfügung

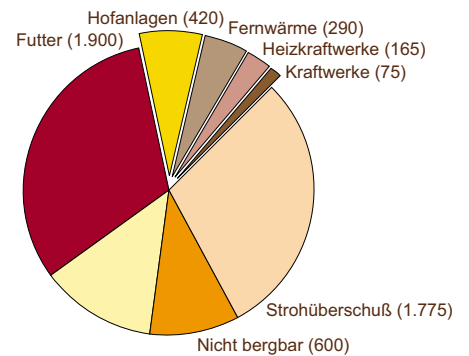


Schaubild 4: Von einer gesamten Strohernte von 6 Millionen Tonnen wurden 1996 ca. 15% für Energiezwecke genutzt (25, 29). "Sonstiges" ist Streu, Mieten u.a. Zahlen in 1000 Tonnen.

stehen. Die Untersuchung operiert mit drei Szenarien, dazu gehören verschiedene denkbare Entwicklungen des theoretisch verfügbaren, bergbaren Strohüberschusses als Folge von Umstellungen der landwirtschaftlichen Produktion, größeren Viehbeständen, Änderungen der umwelt- und agrarpolitischen Gegebenheiten u.a. Die Untersuchung kommt zu dem Schluß, daß theoretisch ausreichende Strohmengen zur Verfügung stehen, in besonders schlechten Erntejahren kann es jedoch zu Mangelsituationen kommen.



foto: biopress/forben skott

Stroh ist ein Abfallprodukt bei der Getreideernte. Auf dem Bild hat der Strohhäcksler des Mähdreschers das Stroh gehäckselt, so daß es untergepflügt werden kann. Die Fläche hinter dem Mähdrescher ist brachgelegt.

kg CO<sub>2</sub>/GJ

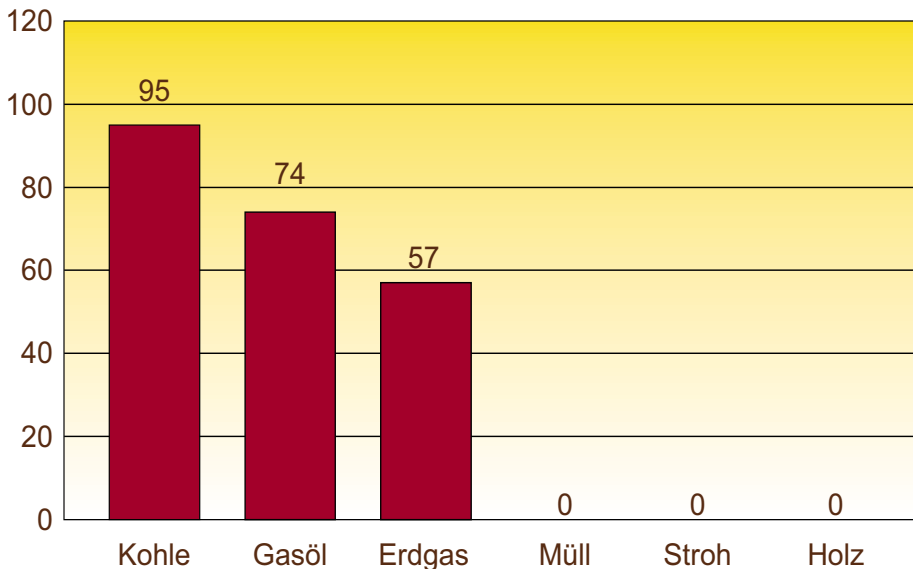


Schaubild 5: Emissionswerte für Brennstoffe. Beim Verbrennen von Kohle z.B. werden 95 kg CO<sub>2</sub> pro GJ Kohle freigesetzt, Biobrennstoffe dagegen sind CO<sub>2</sub>-neutral. Die CO<sub>2</sub>-Werte sind Durchschnittswerte für die genannten Brennstoffe (58).

## Der Markt für Stroh

Der Handel mit Stroh für Energiezwecke zwischen Produzenten und dem Energiesektor ist normalerweise durch mehrjährige Lieferverträge geregelt, die der einzelne Strohproduzent oder eine Gruppe von Strohproduzenten mit einem Abnehmer abschließen.

Abnehmer sind strohbefeuerte Fernwärmewerke und Heizkraftwerke, die durch den Abschluß längerfristiger Lieferverträge sicherstellen, daß sie ihrer Versorgungspflicht gegenüber den Wärmekunden nachkommen können. Allerdings ist nicht der gesamte Handel mit Stroh vertraglich geregelt. Durch den Ankauf von Stroh auf dem Spotmarkt, z.B. bei Maschinengenossenschaften und anderen Zwischenhändlern, können die Werke häufig einen Preisvorteil für einen Teil ihres jährlichen Strohverbrauchs erzielen.

Ein Strohvertrag kann u.a. folgendes regeln:

- Laufzeit und Kündigungsfrist
- Vereinbarte Strohmenge, hierunter Verfahrensregeln bei geringerem/größerem Strohverbrauch, ausbleibenden Lieferungen wegen geringerer Ernteerträge u.a.
- Lieferbedingungen, hierunter Ballentyp, Maße und Gewicht der Ballen, Feuchtegehalt und andere Qualitätskriterien
- Grundpreis und Preisregulierung je nach Feuchtegehalt und Liefertermin
- Bestimmungen über die Regulierung des Grundpreises
- Schiedsklauseln

## Unterpflügen des Strohs

Böden, die jahrelang landwirtschaftlich genutzt worden sind, haben einen niedrigeren Kohlenstoffgehalt als nicht bestellte Böden. Bei der Kultivierung wird dem Boden Kohlenstoff entzogen und als CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre abgegeben. Der Kohlenstoffgehalt ist von Bedeutung für die Fruchtbarkeit der Erde. Um diese Fruchtbarkeit zu erhalten, müssen kultivierten Böden regelmäßig Pflanzenreste oder anderes organisches Material zu-

geführt werden. Optimale oder kritische Grenzen für den Kohlenstoffgehalt des Bodens sind aber nicht bekannt. Versuche in der Versuchsstation Askov seit 1920 haben u.a. ergeben, daß der Kohlenstoffgehalt des Bodens sinkt, unabhängig davon, ob mit handelsüblichem Dünger (NPK) oder mit Haustierdung gedüngt wird.

Das Unterpflügen von Stroh kann wie Gülle, Schlamm und andere Pflanzenreste längerfristig dazu beitragen, den Kohlenstoffgehalt in kultivierten Böden zu erhöhen. Es hat sich gezeigt, daß Gras als Anbaupflanze nach Getreide die gleiche Wirkung hat. Wenn das Stroh vom Feld entfernt und energetisch genutzt wird, besteht der Vorteil darin, daß keine fossilen Brennstoffe verbraucht werden. Der Großteil des Kohlenstoffes im untergepflügten Stroh wird schnell als CO<sub>2</sub> freigesetzt. Wenn fossile Brennstoffe durch Stroh ersetzt werden, wird insgesamt weniger CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre abgegeben.

## Stroh als Brennstoff

Das wichtigste Argument für die Nutzung von Stroh zu Energiezwecken ist, daß dieser Brennstoff CO<sub>2</sub>-neutral ist, den CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre daher nicht erhöht und den Treibhauseffekt nicht verstärkt.

Stroh, das als Brennstoff genutzt werden soll, enthält normalerweise 14-20% Wasser, das während des Verbrennens verdampft. Die übrigbleibende Trockenmasse besteht aus knapp 50% Kohlenstoff, 6% Wasserstoff, 42% Sau-

	Einheit	Gelbes Stroh	Graues Stroh	Hack-schnitzel	Kohle	Erdgas
Feuchtegehalt	%	10-20	10-20	40	12	0
Flüchtige Bestandteile	%	> 70	> 70	> 70	25	100
Asche	%	4	3	0.6-1.5	12	0
Kohlenstoff	%	42	43	50	59	75
Wasserstoff	%	5	5.2	6	3.5	24
Sauerstoff	%	37	38	43	7.3	0.9
Chlorid	%	0.75	0.2	0,02	0.08	-
Stickstoff	%	0.35	0.41	0.3	1	0.9
Schwefel	%	0.16	0.13	0.05	0.8	0
Brennwert, wasser/aschefrei	MJ/kg	18.2	18.7	19.4	32	48
Brennwert, effektiv	MJ/kg	14.4	15	10.4	25	48
Erweichungstemperatur der Asche	°C	800	950	1000	1100	
		- 1000	- 1100	- 1400	- 1400	

Tabelle 1: Brennstoffdaten bei typischem Feuchtegehalt (11 und 32). Bei Auswaschungsversuchen mit Gerstenstroh (33) war der Chloridgehalt nach 150 mm Regen von 0,49% unter 0,05%, der Kaliumgehalt von 1,18% auf 0,22% gefallen. Gleichzeitig war das Stroh grau geworden. Stroh kann auch ohne Auswaschen durch Tau und warme Witterung grau werden (Pilzkolonien).

erstoff sowie geringen Mengen Stickstoff, Schwefel, Silicium und anderen Mineralstoffen, u.a. Alkali (Natrium, Kalium) und Chlorid. Die Verbrennung erfolgt in 4 Phasen. Zuerst verdampft die freie Feuchtigkeit. Danach kommt es zu einer Pyrolyse (Vergasung), bei der je nach Temperatur brennbare Gase entstehen. Es gibt immer einen gewissen Gehalt an Kohlenstoff (CO), Wasserstoff (H<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>) und anderen Kohlenwasserstoffen. Die dritte Phase ist die Gasverbrennung. Wenn ausreichend Sauerstoff zugeführt wird, erfolgt eine vollständige Verbrennung, bei der als Restprodukte CO<sub>2</sub> und Wasser anfallen. Bei unzureichender Sauerstoffzufuhr entstehen Kohlenmonoxid, Ruß (reiner Kohlenstoff), Teer und unverbrannte Kohlenwasserstoffe. In der vierten Phase verbrennt der Koksrest. Bei einer vollständigen Verbrennung bildet sich Kohlendioxid, bei unzureichender Sauerstoffzufuhr Kohlenmonoxid. Zum Schluß bleibt nur Asche zurück, die aus nicht brennbaren, anorganischen Stoffen besteht. Bei unzureichender Verbrennung kann die Asche auch nicht verbrannte Strohreste enthalten.

Die Luft, die über die theoretisch erforderliche Verbrennungsluft hinaus zugeführt wird, wird als Luftüberschuß bezeichnet. Ein gewisser Luftüberschuß ist notwendig, damit überall dort genug Luft vorhanden ist, wo die Gase brennen sollen, obwohl das Gas/Luftgemisch nie völlig einheitlich ist. Das Verhältnis zwischen zugeführter und theoretisch erforderlicher Luft wird als Luftüberschußzahl (Lambda) bezeichnet.

$$= \frac{\text{zugeführte Luft}}{\text{erforderliche Luft}}$$

Durch Kesselwände und Rauchgasrohre wird der größte Teil der Verbrennungswärme an das Kesselwasser abgegeben, der Rest gelangt als Gemisch aus Kohlendioxid, Wasserdampf und geringen Mengen an Kohlenmonoxid und anderen Gasarten, u.a. Teer- und Chlorverbindungen, durch den Schornstein in die Atmosphäre. Der Rauch enthält außerdem kleine Aschepartikel und Alkalisalze.

Das Vorhandensein von Chlor und Alkali im Rauchgas stellt ein Problem dar, denn diese Stoffe reagieren als Natrium- und Kaliumchlorid stark aggressiv und greifen den Stahl in Kesseln und Rohren an, besonders bei hohen Temperaturen.

Auch die Asche ist nicht ohne Probleme, denn ihre Erweichungstemperatur liegt im Vergleich zu anderen Brennstoffen relativ niedrig, beginnend bei 800-850°C. Es hat sich schon gezeigt, daß sie schon

Prozent in trockenem Rauchgas

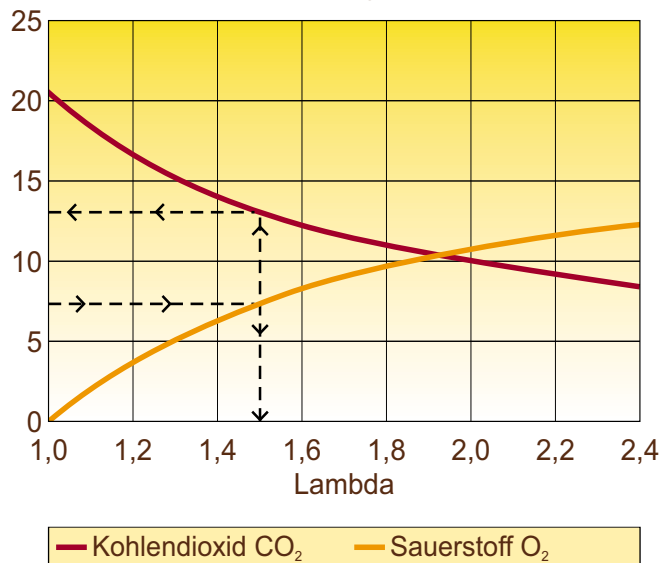


Schaubild 6: Die Strohverbrennung erfolgt am besten bei einer Luftüberschußzahl zwischen 1,4 und 1,6. Beispielsweise werden im Rauchgas 7,5% Sauerstoff gemessen. Die Kurve zeigt ca. 13% Kohlendioxid und einen Luftüberschuß von 1,5.

bei 600°C klebrig werden kann (31). Dies spielt besonders in Kraftwerken eine Rolle, wo man zur Erzielung eines hohen Wirkungsgrades mit einer hohen Dampftemperatur arbeiten will. Dies erfordert eine hohe Überhitzer-temperatur, dabei kann es zu umfassenden Belägen auf den Überhitzerrohren kommen.

Wo eine Kombination von Stroh und Kohle als Brennstoff benutzt wird, bedeutet das Vorhandensein alkalischen Materials in der Asche, daß sie - im Gegensatz zu reiner Kohleasche - nicht als Zuschlagstoff in Baustoffen verwendet werden kann, sondern auf einer überwachten Deponie entsorgt werden muß.

## Strohpellets

Es wurden Versuche mit Strohpellets unternommen, d.h. mit vermahlenem Stroh, das zu Pellets mit einem Durchmesser von 8 oder 10 mm gepreßt wurde (13). Dabei hat sich gezeigt, daß Strohpellets sich als Brennstoff in größeren Kesseln eignen, in kleinen Kesselanlagen sind sie dagegen wegen Asche- und insbesondere Schlackenproblemen weniger geeignet. Strohpellets können mit Melasse als Bindemittel gepreßt werden, außerdem wird ein Anti-Schlackemittel beigemischt, z.B. Kaolin, um die Pellets transportstabil zu machen und zu verhindern, daß die Asche kleb-



Strohpellets (Durchmesser 10 mm) mit Melasse und Kaolin sowie die zugehörige Aschenmenge von 8-10%. Kaolin verhindert, daß die Asche zu Schlackeklumpen verbrennt, Melasse macht die Pellets transportstabil.

rig wird und es zu Schlackenbildung kommt. Der Brennwert der Pellets beträgt ca. 16,3 MJ/kg bei 8% Wasser, das Raumgewicht beträgt ca. das Vierfache von Stroh, das zu Großballen gepreßt wurde, d.h. ca. 550 kg/m<sup>3</sup>.

## Waschen von Stroh

Es ist seit langem bekannt, daß Stroh, das auf dem Feld liegt und Regen ausgesetzt ist, geringere Mengen der aggressiven Stoffe Chlor und Kalium enthält. Im Gegensatz zu "gelbem" Stroh ist dieses "graue" Stroh schonender für den Kessel, da ein Teil der Stoffe, die den Kessel und die Rauchgasrohre angreifen, entfernt ist. Graues Stroh hat außerdem einen etwas höheren Brennwert als gelbes Stroh.

Um die korrodierenden Wirkungen des Strohs auf die Kesselanlage zu verringern, begann das Energieversorgungsunternehmen ELSAM im Frühjahr 1996 mit Versuchen, die unerwünschten Komponenten durch Kochen des Strohs bei 160°C zu entfernen. Später hat man festgestellt, daß Chlor und Kalium auch bei niedrigeren Temperaturen ausgewaschen werden können. Heute geht man davon aus, daß ein Waschen des Strohs bei 50-60°C am wirtschaftlichsten ist. Bisher ist die Strohwäsche nur in kleineren Anlagen erprobt. Eine Anlage, die 125-150.000 Tonnen Stroh pro Jahr behandeln kann, würde laut ELSAM schätzungsweise ca. 200 Mill. DKK kosten (26).

Die Energieverluste durch Waschen, Trocknen und Auswaschen organischer Stoffe betragen ca. 8% des Brennwertes des Strohs. Diese Kosten werden allerdings durch die längere Lebensdauer der Kessel ausgeglichen, da keine Korrosionsprobleme entstehen. Ein Waschen des Strohs ist vermutlich auch im Hinblick auf die anschließende Verwendung der Flugasche vorteilhaft. Strohasche, die keine Alkalisalze und andere Verunreinigungen enthält, kann nämlich als Zuschlagstoff in Baustoffen verwendet werden.

## Strohpreis

Der Handelspreis für Stroh zu Energiezwecken ist ständig Gegenstand

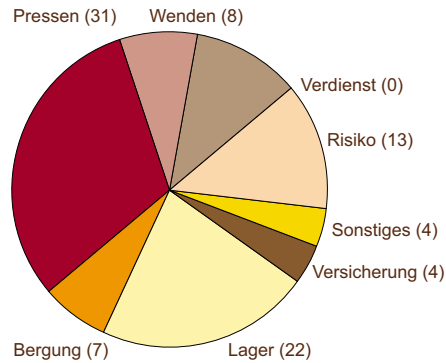


Schaubild 7: Im April 1997 ermittelte das "Landskontoret for Bygninger og Maskiner" (Landesstelle für Gebäude und Maschinen) einen Produktionspreis von DKK 466,- pro Tonne Stroh für Energiezwecke. Hierzu kommen die Transportkosten zum Werk (27). Zahlenangaben in %.

intensiver Verhandlungen zwischen Lieferanten und Abnehmern. In den letzten Jahren, in denen die Nachfrage von seiten der großen Stromerzeuger aufgrund der Biomasse-Vereinbarung ständig gestiegen ist, war der Markt von einem gewissen Preisdruck geprägt. Der Strohpreis ist daher nicht nur Ausdruck für Produktionskosten und Gewinn, sondern auch Teil der Strategie der Beteiligten zur Erfüllung der Biomasse-Vereinbarung. Aus diesem Grund sieht man Preise von 360 bis ca. 500 DKK pro Tonne. 1997 lag die Preisspanne zwischen Strohproduzenten und Aufkäufern der Kraftwerke bei gut 80 DKK pro Tonne, d.h. bei 466, bzw. 380 DKK. Ausschreibungen auf die Lieferung von Stroh, die 1997 und 1998 von Fernwärmewerken östlich des Großen Belts durchgeführt wurden, ergaben einen Preis von 350-400 DKK pro Tonne, geliefert im Werk. Westlich des Großen Belts lag der Strohpreis bei den zuletzt abgeschlossenen Lieferverträgen bei 320-370 DKK pro Tonne, ebenfalls geliefert im Werk.

Der Strohpreis des Produzenten umfaßt neben Verzinsung und Abschreibung der Maschinen, die bei der Bergung des Strohs benutzt werden, eine Reihe von anderen Elementen, z.B. Arbeitslohn und Brennstoffkosten für das Wenden, Pressen und Bergen sowie Ko-

sten für die Lagerung und den Transport zum Werk. Dazu kommen entgangener Düngewert, Versicherungen sowie Risikodeckung, z.B. durch Schwund aufgrund schlechter Witterung in der Erntezeit und Schwund bei der Lagerung.

Ein Begriff, der ab und zu benutzt wird, ist der "volkswirtschaftliche Strohpreis". Dieser Preis ist ohne Steuern und Abgaben und gibt daher die realen Produktionskosten wider. Der volkswirtschaftliche Preis wird z.B. für Preisvergleiche zwischen heimischen und importierten Brennstoffen benutzt. Es handelt sich also eher um ein Planungswerkzeug als um eine Preisberechnung für den täglichen Handel. Dieser von der dänischen Energiebehörde festgesetzte Preis (58) betrug im Oktober 1994 240 DKK/Tonne, geliefert im Werk. Hiervon sind 43 DKK/Tonne Transportkosten und 197 DKK/Tonne sonstige Erzeugungskosten.

## Transportenergie

Die vielen Strohtransporte mit Lkw zu den Werken oder Transporte über weite Entfernungen führen natürlich dazu, daß von den Motoren CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre abgegeben wird.

Ein Lkw verbraucht auf 2-3 Kilometern einen Liter Diesel, der 2,7 kg CO<sub>2</sub> freisetzt. Die CO<sub>2</sub>-Emission pro gefahrenen Kilometer kann daher auf ungefähr 1 kg festgesetzt werden. Eine Ladung Stroh mit einem Brennwert von 14,5 GJ/Tonne wiegt 11-12 Tonnen und repräsentiert eine Energiemenge von ca. 170 GJ. Da die CO<sub>2</sub>-Emission aus Kohle ca. 100 kg/GJ beträgt, entspricht das Stroh also einer CO<sub>2</sub>-Emission von ca. 17 Tonnen, sofern Kohle statt Stroh verfeuert worden wäre.

Das bedeutet, daß der Lkw 17.000 km mit einer Ladung Stroh fahren müßte, um die gleiche Menge CO<sub>2</sub> zu emittieren, die dadurch gespart wird, daß statt Kohle das Stroh auf dem Lkw als Brennstoff verwendet wird. Anders gesagt: die CO<sub>2</sub>-Einsparung verringert sich um ca. 0,6% pro 100 km Transportweg.