

ABSCHLUSSBERICHT

Wirtschaftlichkeit verschiedener Wertschöpfketten von halmgutbasierten Heizwerken mit Nahwärmenetzen (WWHH)



IMPRESSUM

Titel

Wirtschaftlichkeit verschiedener Wertschöpfketten von halmgutbasierten Heizwerken mit Nahwärmenetzen (WWHH)

Berichtszeitraum

01.06.2017 -31.05.2019

Herausgeber

Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern
Dorfplatz 1/OT Gülzow • 18276 Gülzow-Prüzen

Telefon: 03843/789-0

Fax: 03843/789-111

poststelle@lfa.mvnet.de

www.lfamv.de

Autoren

Telse Vogel • Telefon: 03843 789 254

Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern
Dorfplatz 1/OT Gülzow • 18276 Gülzow-Prüzen

Titelfoto

Matthias Dietze

[Dummerstorf, 01.06.2019]

GEFÖRDERT DURCH

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



INHALT

1	Zusammenfassung.....	7
2	Einleitung.....	9
3	Stand des Wissens.....	11
3.1	Bioenergie in Europa und Deutschland	11
3.2	Brennstoffeigenschaften von Stroh und Heu	14
3.3	Planung von einem Halmgutheiz(kraft)werk	16
4	Material & Methoden	19
4.1	Brennstoffbereitstellung.....	19
4.2	Wärmebereitstellung	20
4.2.1	Modellheizwerk	21
4.2.2	Modellheizkraftwerk.....	23
4.3	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	24
4.3.1	Brennstoffbereitstellungskosten.....	24
4.3.2	Wärmegestehungskosten.....	24
4.3.3	Sensitivitätsanalyse	25
4.4	Treibhausgasbilanz	26
5	Ökonomische Analyse	29
5.1	Kostenstruktur der Halmgutheizwerke	29
5.2	Sensitivitätsanalyse	30
5.2.1	Wärmepreis.....	30
5.2.2	Auslastung	31
5.2.3	Brennstoffpreis	33
5.2.3.1	Marktpreis für Heu und Stroh	33
5.2.3.2	Herstellungskosten für Stroh	35
5.2.3.3	Herstellungskosten für Heu	36
5.2.3.4	Brennstoffqualität	38
5.2.3.5	Transportkosten	39
5.2.3.6	Lagerung.....	40
5.2.3.7	Nahwärmenetz	41
5.2.4	Aschenutzung und -entsorgung.....	42
5.2.5	Finanzierung und Fördermöglichkeiten.....	45
5.3	Wettbewerbsfähigkeit von einem Halmgutheizkraftwerk	46
6	Treibhausgasbilanz	48
6.1	Treibhausgasminderungspotential.....	48
6.2	Effekt einer Honorierung der Klimaschutzleistung auf die Wettbewerbsfähigkeit von Halmgutheizwerken	51
7	Fazit.....	53
7.1	Empfehlungen zur Nutzung von Stroh und Heu in Heiz(kraft)werken aus Sicht der Wirtschaftlichkeit und des Klimaschutzes	53
7.2	Handlungsbedarf der Politik zur Beförderung der Nutzung von Heu und Stroh in der Landwirtschaft	54
8	Literaturverzeichnis	55

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1	Europäische Klimaschutz- und Energieversorgungsziele für 2020 und 2030 und die dazugehörige Gesetzgebung (Kuželicki, 2018).....	11
Abbildung 2	Energiebereitstellung in Deutschland aus erneuerbaren Energieträgern 2018 (UBA, 2019).....	12
Abbildung 3	Heutige Biomassenutzung Europa (EU28) für den Einsatz im Bioenergiesektor und minimal bzw. maximal Prognose für 2050 (Calderón, 2018).....	13
Abbildung 4	Beschäftigungsverteilung im Bereich der erneuerbaren Energien 2016 in Europa und in Milliarden Euro (Calderón, 2018).....	13
Abbildung 5	Wertschöpfungskette.....	19
Abbildung 6	Verfahrensschritte der Heubereitstellung.....	19
Abbildung 7	Kostenstruktur von Halmgutheizwerken im Vergleich zu Gasheizwerken und in Abhängigkeit von der Auslastung (1.750 h, 5.000 h).....	29
Abbildung 8	Veränderung des Betriebsergebnisses durch die Veränderung des Wärmepreises, der Auslastung, des Brennstoffpreises und der Förderhöhe um 20%.....	30
Abbildung 9	Wärmegestehungskosten von einem Halmgutheizwerk in Abhängigkeit von der Auslastung und im Vergleich zum Gaspreis für Haushalte, Gewerbe und Industrie.....	31
Abbildung 10	Heizlast zur Bereitstellung von Raumwärme für eine Gemeinde (Bürogebäude, Gewächshaus, Bauhof) im Vergleich zu einem landwirtschaftlichen Betrieb mit Tierhaltung (900 Sauen) (Dietze und Heilmann, 2010).....	32
Abbildung 11	Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs einer Gesamtanlage unterteilt in Wärmeverluste, Warmwasser und Raumwärme (Nussbaum et al., 2017).	32
Abbildung 12	Wärmegestehungskosten in Abhängigkeit vom Brennstoffpreis und im Vergleich zum Wärmepreis (niedrig und hoch)	33
Abbildung 13	Preisentwicklung von Stroh und Heu im Vergleich zu Erdgas in Deutschland für den Zeitraum 2015 bis September 2018 (Quelle Stroh und Heupreis: Zinke, 2019; Gaspreis: BMWI, 2019).....	34
Abbildung 14	Marktpreis von Stroh und Heu nach Bundesland und Region im Februar 2019 (Zinke, 2019)	34
Abbildung 15	Transportkosten für Heu in Abhängigkeit von der Transportentfernung und der Transporttechnik	39
Abbildung 16	Transportkosten in Abhängigkeit ob auf dem Rückweg eine Leerfracht oder Rückbefrachtung erfolgt	40
Abbildung 17	Kostenstruktur der Lagerung in Abhängigkeit von der Lagerart	41
Abbildung 18	Einfluss der Kosten eines Nahwärmenetzes (NWN) auf das Betriebsergebnis eines Halmgutheizwerkes in Abhängigkeit von der Netzlänge (800 m, 1.200 m) und einer Förderung von 30% bezogen auf das Investitionsvolumen für das Nahwärmenetz.....	42
Abbildung 19	Energiegestehungskosten von einem Halmgutheizkraftwerk (eigene Berechnungen) im Vergleich zum Strom- und Wärmepreis für Haushalte und Industrie (BMWI, 2019).....	46
Abbildung 20	Treibhausgasemissionen bei der Nutzung von Stroh und Heu als Brennstoff in Heiz(kraft)werken	48

Abbildung 21	Vorräte an organischem Kohlenstoff im Boden (0 – 100 cm) von Mineralböden mit Ackernutzung, Dauergrünland, sowie in landwirtschaftlich genutzten Moor- und moorähnlichen kohlenstoffreichen Böden (verändert nach: Flessa et al., 2018).....	49
Abbildung 22	Wärmegestehungskosten von Halmgutheiz(kraft)werken in Abhängigkeit von der Honorierung der Klimaschutzleistung (20 bzw. 80 Euro/t CO ₂ -Äqui.) und der entgangenen C-Speicherung durch Strohentnahme (Humusbilanz)	51

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Zusammensetzung der Biomasse und Brennstoffeigenschaften (FNR, 2014b).....	14
Tabelle 2:	Emissionsgrenzwerte für Biomassefeuerungsanlagen, die Stroh oder ähnliche pflanzliche Stoffe einsetzen nach der gültigen TA Luft 2002 und einem Entwurf für die Novellierung der TA-Luft (Entwurf TA Luft 09/2016) bezogen auf einen Sauerstoffwert von 6%.	15
Tabelle 3:	Grobgliederung einer Machbarkeitsstudie (FNR 2014b).....	16
Tabelle 4:	Rechtsvorschriften für das Genehmigungsverfahren nach BImSchG für Halmgutheizwerke im Leistungsbereich 0,1 MW bis < 50MW.	18
Tabelle 5:	Mechanisierungsgrad in den einzelnen Verfahrensschritten nach dem KTBL-Feldrechner.....	20
Tabelle 6:	Kenndaten der untersuchten Heizwerke.....	21
Tabelle 7:	Kennzahlen des Modellheizwerkes	21
Tabelle 8:	Wirtschaftliche Kennzahlen vom Modellheizwerk	22
Tabelle 9:	Wirtschaftliche Kennzahlen vom Modellheizkraftwerk	24
Tabelle 10:	Referenzwert der Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit.....	25
Tabelle 11:	Emissionsfaktoren nach Biograce II (Biograce II, 2015)	26
Tabelle 12:	Inputfaktoren für die einzelnen Verfahrensschritte der Heu- und Strohbereitstellung	27
Tabelle 13:	Strohbereitstellung: Deckungsbeitrag bei Eigenmechanisierung (KTBL, 2018).....	35
Tabelle 14:	Strohbereitstellung. Betriebsergebnis bei Arbeitserledigung durch ein Lohnunternehmen.....	36
Tabelle 15:	Heuernte: Deckungsbeitrag bei Eigenmechanisierung (KTBL, 2018)	37
Tabelle 16:	Heuernte: Betriebsergebnis bei Arbeitserledigung durch ein Lohnunternehmen.....	37
Tabelle 17:	Varianten und Prämiensätze der extensiven Bewirtschaftung von Dauergrünlandflächen in Mecklenburg-Vorpommern.....	38
Tabelle 18:	Regelwerke für die flächenhafte Verwertung von mineralischen Abfällen/ Biomasseaschen in und auf Böden (Schiemenz, 2012).....	43
Tabelle 19:	Definition der Düngemitteltypen nach DüMV (2012) und Möglichkeit der Zuordnung der Halmgutaschen zu den Düngemitteltypen (Schlegel, 2019).....	44

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

a	Jahr
Bh	Betriebsstunden
Ca	Calcium
Ca(OH) ₂	Calciumhydroxid
Cl	Chlor
d	Tag
h	Stunde
ha	Hektar
HCl	Chlorwasserstoff
K	Kalium
kg	Kilogramm
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
l	Liter
m	Meter
MCP	Medium Combustion Plant
Mio.	Millionen
MJ	Megajoule
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
N	Stickstoff
NO _x	Stickstoffoxide
PJ	Petajoule
S	Schwefel
t	Tonnen
THG	Treibhausgas
TM	Trockenmasse

DANKSAGUNG

Wir danken den Praxisbetrieben für die Bereitstellung der Betriebsdaten und für ihre konstruktive Mitarbeit, ohne die die vorliegende Auswertung nicht möglich gewesen wäre.

Dieses Forschungs- und Entwicklungsvorhaben wird durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft gefördert und durch den Projektträger Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) administrativ betreut. Wir bedanken uns für die Finanzierung und die sehr gute Zusammenarbeit.

1 Zusammenfassung

In Deutschland könnten 8 bis 13 Mio. t Stroh für die Erzeugung von Energie eingesetzt werden, die nicht in Konkurrenz zur Tierhaltung und zum Erhalt der Humusbilanz stehen. Neben Stroh kann auch Heu, insbesondere von extensiv bewirtschafteten Flächen als Brennstoff in Heizwerken eingesetzt werden, da häufig Nutzungsalternativen für die anfallende Biomasse fehlen. Die Nutzung dieser Biomassepotenziale in Heiz(kraft)werken ist von besonderem Interesse, da die Technik bekannt ist und einen hohen Wirkungsgrad aufweist. Zudem kann die energetische Verwertung des Halmgutes (Heu und Stroh) die Wertschöpfung im ländlichen Raum steigern und einen wichtigen Beitrag zum Erreichen der Klimaschutzziele Deutschlands leisten. In früheren Untersuchungen wurde häufig eine geringere wirtschaftliche Effizienz von Halmgutheizwerken im Vergleich zu Gasheizwerken festgestellt. Die Gründe dafür müssen ermittelt werden, um die Potenziale an Stroh und Heu verwerten zu können.

In dem Vorhaben „Wirtschaftlichkeit verschiedener Wertschöpfungsketten von halmgutbasierten Heizwerken mit Nahwärmenetzen (WWHH)“ wurde anhand einer Wirtschaftlichkeitsanalyse und einer Treibhausgasbilanz von vier Halmgutheizwerken und einem Halmgutheizkraftwerk die Wettbewerbsfähigkeit und das Treibhausgasvermeidungspotenzial entlang der gesamten Wertschöpfungskette bestimmt. Die Analyse basiert auf realen Daten aus der Praxis, die im Rahmen einer Befragung von einem Lohnunternehmen (Brennstoffbereitstellung) und fünf Heiz(kraft)werken (Energiebereitstellung) ermittelt wurden. Für die weiteren Untersuchungen (Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, Treibhausgasbilanz) wurde auf Grundlage der Praxisdaten ein Modellheiz(kraft)werk entwickelt, das die Realität widerspiegelt ohne Rückschlüsse auf die einzelnen Praxisbetriebe ziehen zu können.

In einem ersten Schritt wurde die Kostenstruktur (kapital-, betriebs- und verbrauchsgebundene Kosten) der Halmgutheizwerke im Vergleich zu einem Gasheizwerk ermittelt. Mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse wurden die Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit eines Halmgutheiz(kraft)werks ermittelt und Planungsrichtwerte abgeleitet. Zudem wurde eine Treibhausgasbilanz durchgeführt, durch Gewichtung der Treibhausgasrelevanten Inputdaten mit den Emissionsfaktoren nach Biograce II. Dabei wurde außerdem die potenziell entgangene C-Speicherung im Boden durch die Strohentnahme berücksichtigt.

Die Kostenstruktur eines Halmgutheizwerkes unterscheidet sich deutlich von der eines Gasheizwerkes. Die Wärmegestehungskosten (bzw. Stromgestehungskosten) von einem Gasheizwerk werden maßgeblich vom Brennstoffpreis bestimmt. Demgegenüber werden die Wärmegestehungskosten von einem Halmgutheizwerk in Abhängigkeit von der Auslastung (Betriebsstunden (Bh)) neben den verbrauchsgebundenen Kosten (1750 Bh: 40%, 5000 Bh: 64%) von den kapitalgebundenen Kosten (1750 Bh: 28%, 5000 Bh: 16%) und den betriebsgebundenen Kosten (1750 Bh: 32%, 5000 Bh: 22%) bestimmt. Diese lassen sich mit den technisch aufwendigen Brennstoffeigenschaften und den damit verbundenen hohen Investitions- und Instandhaltungskosten erklären. Aus diesem Grund sollten zusätzliche Investitionskosten für die Infrastruktur (z.B. Nahwärmenetz, Lager) möglichst gering gehalten werden. Dies sollte bei der Wahl des Standorts berücksichtigt werden. Deswegen eignen sich für den Neubau von Halmgutheizwerke Standorte, an denen die Einspeisung der Wärme in ein vorhandenes Nahwärmenetz erfolgen kann.

Um eine Wettbewerbsfähigkeit der Halmgutheizwerke mit Gasheizwerken zu erreichen, ist eine Auslastung von mindestens 50% (Heizwerke) bzw. 60% Heiz(kraft)werke notwendig. Aus diesem Grund sollte die Auslastung an die Abnehmerstruktur angepasst sein. Außerdem sollte zum Erreichen einer hohen Auslastung das Heizwerk so konzipiert werden, dass es nur zur Deckung der Grundlast eingesetzt wird.

Zudem ist es erforderlich, dass der Brennstoffpreis für das Halmgut im Durchschnitt bei max. 80 Euro/t liegt. Um die Brennstoffkosten gering zu halten, sollte in der Region des Heizwerkstandorts ausreichend Halmgut für die energetische Verwertung vorhanden sein. Das heißt, eine geringe Nutzungskonkurrenz z.B. zur Tierhaltung als auch kurze Transportwege können die Brennstoffkosten reduzieren. Dabei ist es erforderlich, den Brennstoffpreis und die Logistik in langfristigen Verträgen festzulegen.

Außerdem sind eine hohe Wärmeabnehmerdichte und eine ausreichende Vergütung der bereitgestellten Energie für einen wirtschaftlichen Betrieb eines Halmgutheizwerkes erforderlich. Als Abnehmer eignen sich vor allem Betriebe mit einem hohen Energiebedarf, Mehrfamilienhäuser und öffentliche Einrichtungen, die einen hohen Wärmeverbrauch aufweisen. Der durchschnittliche Preis für die bereitgestellte Wärme sollte bei dem hier betrachteten Modellheiz(kraft)werken (Auslastung: 5.000 h/a) bei mindestens 55 Euro/MWh und für die bereitgestellte Energie bei Heizkraftwerken durchschnittlich über 65 Euro/MWh liegen. Damit ist eine Wettbewerbsfähigkeit mit einem Gasheizwerk nur schwer zu erreichen, wenn ein hoher Anteil der Abnehmer aus der Industrie (Gaspreis ca. 30 Euro/MWh) stammt. Die Höhe der Wärmeabnahme und der Wärmepreis sollte deswegen vorab in Verträgen über einen Zeitraum von mindestens fünf Jahren festgelegt werden.

Die Treibhausgasvermeidung von Stroh liegt im Vergleich zu Gas bei durchschnittlich 87% ohne Berücksichtigung der entgangenen CO₂-Speicherung im Boden durch die Strohentnahme (Humusbilanz). Bei Berücksichtigung dieser würde die Klimaschutzleistung von Strohheiz(kraft)werken zwar reduziert werden, dennoch würde ein Strohheiz(kraft)werk selbst unter Berücksichtigung der Humusbilanz die Treibhausgasemissionen um 45% im Vergleich zu einem Gasheizwerk senken. Bei Honorierung dieser Klimaschutzleistung könnten die Wärmegestehungskosten um bis zu 11% (Honorierung: 20 Euro/t CO₂-Äqui.) bzw. um bis zu 42% (Honorierung: 80 Euro/t CO₂-Äqui.) gesenkt und damit die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber einem Gasheizwerk deutlich gesteigert werden.

Die Verwertung von Stroh bzw. Heu in Heiz(kraft)werken ist aus technischer Sicht schon heute mit hohen Wirkungsgraden möglich und kann darüber hinaus die Wertschöpfung im ländlichen Raum steigern und einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Ein wirtschaftlicher Betrieb eines Halmgutheiz(kraft)werkes bedarf aber optimaler Bedingungen. Als Standort eignen sich zum einen landwirtschaftliche Betriebe mit einem hohen Wärmebedarf (z.B. Sauenhaltung oder Geflügelhaltung) und Kleinstädte im ländlichen Raum mit einer hohen Wärmedichte sowie einem hohen Potenzial an Stroh und Heu. Die Ableitung von konkreten Zahlen ist dabei schwierig, weil viele Faktoren die Wirtschaftlichkeit von Halmgutheizwerken beeinflussen und diese auch voneinander abhängen.

2 Einleitung

Das Klimaschutzziel der Europäischen Union und Deutschlands ist seit 2010 die „Zwei-Grad-Obergrenze“ für die globale Erwärmung gegenüber vorindustriellen Werten (UBA, 2019a). Die globale Erwärmung durch menschliche Aktivitäten beträgt derzeit 1°C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau (IPCC, 2018). Alleine eine globale Erwärmung von 1,5°C ist mit klimabedingten Folgen für die Umwelt und Risiken für die menschliche Gesundheit verbunden, die aber geringer im Vergleich zu einer globalen Erwärmung um 2% ausfallen (IPCC, 2018). Ziel sollte damit eine möglichst hohe Einsparung von Treibhausgas(THG)-Emissionen sein.

In Deutschland ist der Energiesektor derzeit für mehr als 80% der THG-Emissionen verantwortlich (UBA, 2019b). Aus diesem Grund müssen zum Erreichen der Klimaschutzziele die THG-Emissionen durch den Einsatz erneuerbarer Energien und einer Steigerung der Energieeffizienz reduziert werden.

Bioenergie wird dabei aufgrund ihrer vielseitigen Einsatzmöglichkeiten eine bedeutende Rolle spielen. Im Wärmesektor nimmt Bioenergie eine Schlüsselfunktion ein, die derzeit hauptsächlich auf der Nutzung von Holz beruht (Calderón, 2018). In Zukunft wird die Nutzung von Biomasse aus der Landwirtschaft einen höheren Anteil im Bioenergiesektor einnehmen (Bioenergy Europe, 2018). Die Produktion von Biomasse zur energetischen Verwertung auf landwirtschaftlichen Flächen führt zu einer Steigerung der Flächenkonkurrenz zwischen der Nahrungsmittel- bzw. Futtermittelproduktion, dem Anbau von Biomasse zur stofflichen Nutzung und dem Umweltschutz. Diese Konkurrenz um Flächen wird durch den weltweit ansteigenden Bedarf an Flächen für die Nahrungsmittelproduktion aufgrund der wachsenden Bevölkerung noch verschärft. Mit der energetischen Nutzung von Koppelprodukten aus der Landwirtschaft kann dieser Entwicklung entgegengewirkt werden (Volpi, 2018). Dabei sollte der Erhalt der Bodenfruchtbarkeit (insbesondere Bodenkohlenstoff) oberste Priorität haben.

Derzeit stehen in Deutschland 8 bis 13 Mio. t Stroh zur Verfügung, die nicht in Konkurrenz zur Tierhaltung, zum Erhalt der Humusbilanz oder anderen Nutzungsalternativen stehen (Weiser et al., 2014). Die Bereitstellung von Stroh als Koppelprodukt ist mit einem relativ geringen zusätzlichen Aufwand verbunden und weist entsprechend geringe Bereitstellungskosten auf. Neben Stroh kann auch Heu, insbesondere von extensiv bewirtschafteten Flächen, als Brennstoff in Heizwerken eingesetzt werden, da auch hier häufig Nutzungsalternativen für die anfallende Biomasse fehlen (BMU, 2013). Der Ausbau der Bioenergie auf Basis dieser Stroh- und Heupotenziale könnte damit zur Steigerung der Wertschöpfung im ländlichen Raum beitragen und die Gefahr einer Flächenkonkurrenz zwischen der Nahrungsmittelproduktion und der Bioenergieproduktion reduzieren.

Ein hohes THG-Vermeidungspotenzial beim Einsatz von Stroh in Heizwerken konnte bereits nachgewiesen werden (Zeddies et al., 2014). Die Nutzung von halmgutartiger Biomasse in Heizwerken ist aber im Vergleich zu fossilen Energieträgern technisch aufwendig und folglich mit höheren Investitions- und Wartungskosten im Vergleich zu fossilbasierten Heizwerken verbunden (FNR, 2014). Zudem hemmen die derzeit geringen Preise für fossile Energieträger und die geplante Senkung der Grenzwerte für Schadstoffe (Entwurf TA Luft, 2016) die Installation von neuen halmgutbasierten Heizwerken in Deutschland. Aus diesen Gründen ist ein wirtschaftlicher Betrieb von Halmgutheizwerken derzeit nur schwer möglich. Deswegen ist es von großer Bedeutung, die Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit von Halmgutheizwerken zu ermitteln, um die Optimierungsmöglichkeiten aufzuzeigen und damit die Wettbewerbsfähigkeit mit Gasheizwerken langfristig zu steigern.

In dem Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Wirtschaftlichkeit verschiedener Wertschöpfungsketten von halmgutbasierten Heizwerken mit Nahwärmenetzen (WWHH)“ wurde die Wettbewerbsfähigkeit und die THG-Vermeidung von Halmgutheizwerken im Vergleich zu Gasheizwerken untersucht. Dabei wurde die gesamte Wertschöpfungskette berücksichtigt. Die Analyse beruht auf Betriebsdaten von vier Heizwerken und einem Heizkraftwerk, die ihre Wärme in ein Nahwärmenetz einspeisen. Außerdem wurde ein Lohnunternehmen hinsichtlich der Heu- und Strohbereitstellung befragt.

Ziel war es, die Einflussfaktoren auf die Wettbewerbsfähigkeit von Halmgutheizwerken im Vergleich zu Gasheizwerken zu ermitteln und Optimierungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Zudem sollte die Höhe der THG-Vermeidung ermittelt und der Effekt einer Honorierung der Klimaschutzleistung auf die Wettbewerbsfähigkeit eines Halmgutheizwerkes bestimmt werden.

Anhand der Ergebnisse wurden Planungsrichtwerte abgeleitet, die in einem Leitfaden zusammengefasst wurden. Dieser Leitfaden soll die unterschiedlichen Akteure (z.B. Landwirt, Planungsbüro, Betreiber der Anlage) bei der Planung und Installation von halmgutbasierten Heizwerken unterstützen und damit die Praxiseinführung von halmgutbasierten Heizwerken befördern.

3 Stand des Wissens

3.1 Bioenergie in Europa und Deutschland

Im Dezember 2018 wurde die Neufassung der erneuerbare-Energien-Richtlinie (Renewable Energy directive, RED II), die Governance-Verordnung und die Energieeffizienz-Richtlinie formell verabschiedet (Volpi, 2018).

Demnach sind verbindliche Ziele für die europäische Energie- und Klimapolitik bis 2030 (Volpi, 2018):

- die Reduktion der THG-Emissionen um 40% gegenüber 1990,
- die Steigerung des Anteils der erneuerbaren Energien am Gesamtenergieverbrauch auf mindestens 32% sowie
- die Verringerung des Energieverbrauchs um mindestens 32,5% aufgrund verbesserter Effizienz (vgl. Abbildung 1).

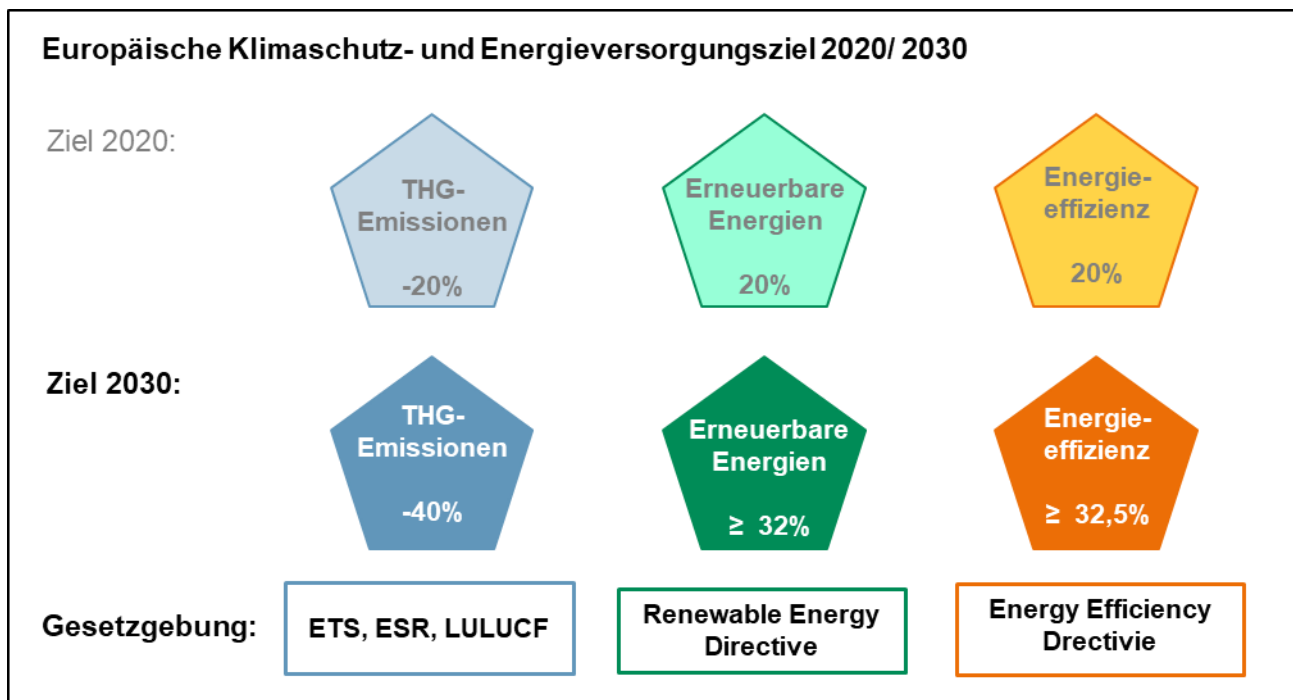


Abbildung 1 Europäische Klimaschutz- und Energieversorgungsziele für 2020 und 2030 und die dazugehörige Gesetzgebung (Kuželički, 2018)

(ETS: Emissionshandelssystem der EU, ESR: Zielvorgaben zur Reduzierung der THG-Emissionen außerhalb des ETS, LULUCF: Verordnung über die Einbeziehung der Emissionen von Treibhausgasen aus Landnutzung und Forstwirtschaft)

Dem Ausbau von Bioenergie kommt dabei eine zentrale Rolle zum Erreichen der Klimaschutzziele in Europa zu. So kann Bioenergie in allen energierelevanten Sektoren eingesetzt werden: Verkehr, Wärmeproduktion sowie Stromproduktion und umfasst gasförmige (Biogas und Methan), flüssige (Biokraftstoff) und feste Biomasse (z.B. Holz, Strohballen, Heuballen). Bei der eingesetzten Biomasse unterscheidet man zwischen Energiepflanzen und Reststoffen aus der Landwirtschaft und Holz aus der Forstwirtschaft und der nachgelagerten Holzverarbeitung. Der Einsatz von Holz hat dabei einen Anteil von 70% an der gesamten Bioenergie in Europa.

Generell hat Bioenergie in Europa einen Anteil von 17% im Wärme-, von 5% im Strom- und von 6% im Transportsektor (Calderón, 2018). In Europa nimmt Bioenergie im Wärme- (87%) und

Transportsektor (81%) unter den erneuerbaren Energien damit eine Schlüsselfunktion ein. Dabei hat Deutschland in Europa mit 15% den höchsten Anteil am Verbrauch von Wärme aus Biomasse (Caldéron, 2018). So liegt in Deutschland der Anteil von Bioenergie an der Bereitstellung von Wärme bei 34%, von Strom bei ca. 12% und von Kraftstoff (Verkehr) bei 7% (UBA, 2019, vgl. auch Abbildung 2). Die Wärmebereitstellung auf Basis von erneuerbare Energien beruht dabei zu 90% auf fester Biomasse, während dieser Anteil in den Sektoren Strom und Verkehr sehr gering ist. In Deutschland und Europa wird der größte Teil der durch Biomasse produzierten Wärme durch die Nutzung von holziger Biomasse in Heiz(kraft)werken bereitgestellt. Im Bioenergiesektor werden dabei hauptsächlich Holznebenprodukte genutzt.

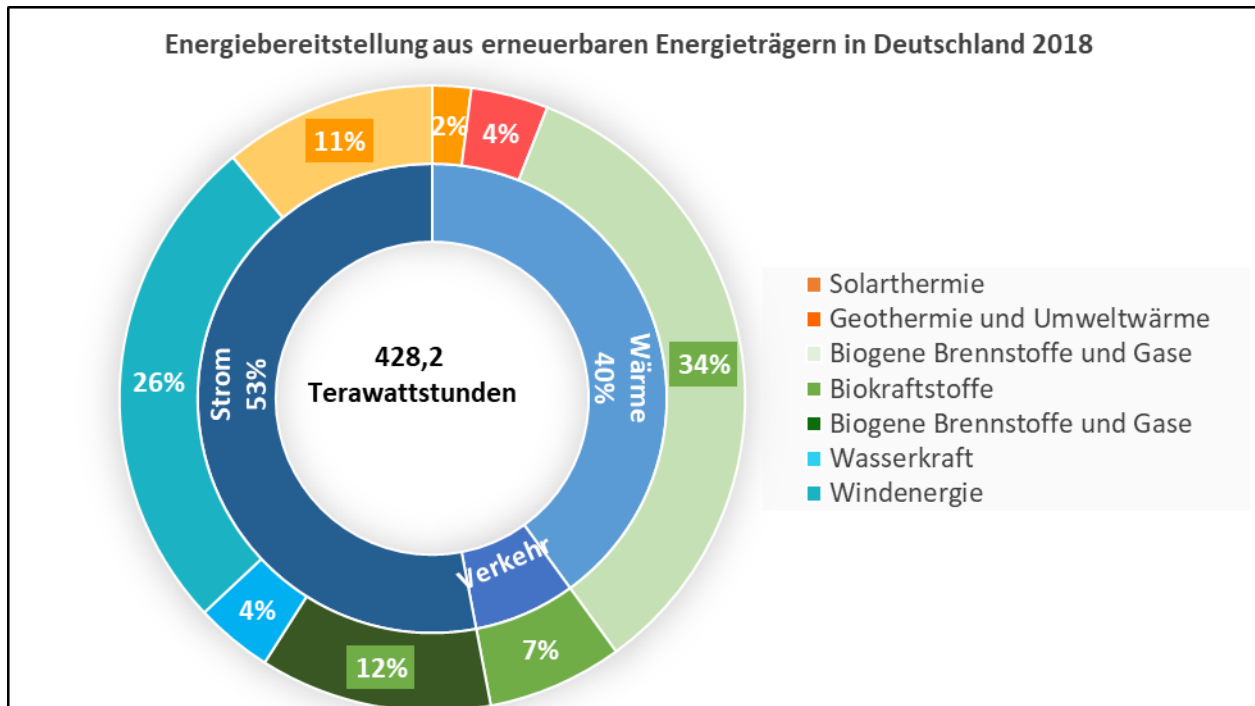


Abbildung 2 Energiebereitstellung in Deutschland aus erneuerbaren Energieträgern 2018 (UBA, 2019)

In Zukunft ist zu erwarten, dass in Europa landwirtschaftliche Biomasse verstärkt für die Produktion von Bioenergie zum Einsatz kommen wird (Calderón, 2018; vgl. Abbildung 3). Die Nutzung von landwirtschaftlicher Biomasse hat in Europa mit 30% einen geringeren Anteil an der Bereitstellung von Bioenergie. Derzeit wird landwirtschaftliche Biomasse hauptsächlich zur Biogasproduktion (ca. 12%) oder zur Herstellung von Biokraftstoffen (ca. 12%) eingesetzt und beruht hauptsächlich auf der Nutzung von Energiepflanzen, insbesondere von Mais. Der Anteil von Mais für die energetische Nutzung lag 2017 bei ca. 36% der gesamten Maisanbaufläche (2,5 Mio. ha) (FNR, 2018). Der steigende Anbau von Mais und die damit verbundenen Risiken (z.B. Verlust der Artenvielfalt, Rückgang der Bodenfruchtbarkeit) führten dazu, dass der Anbau von Energiepflanzen kontrovers diskutiert wird (Linhart und Dhungel, 2013).

Generell steigt derzeit die Nachfrage nach Agrar- und Forstprodukten aufgrund des globalen Anstiegs der Weltbevölkerung. Damit steigt auch die Konkurrenz um landwirtschaftliche Flächen zwischen Nahrungs- und Futtermittelproduktion, der stofflichen Nutzung und der Erzeugung von Bioenergie (UBA, 2012). Dieser Konflikt wird durch den Klimawandel und seinen Auswirkungen auf die Biomasseproduktion noch verstärkt und mündet derzeit in einer fortschreitenden Übernutzung von landwirtschaftlichen Flächen (IPCC, 2018). Die energetische Nutzung von Stroh und Heu könnten zur Entschärfung dieses Konflikts beitragen und gleichzeitig die Nachhaltigkeit von Bioenergie steigern.

In Deutschland werden ca. 16,7 Millionen Hektar landwirtschaftlich genutzt. Das entspricht fast der Hälfte der Fläche der Bundesrepublik Deutschland. Davon sind ca. 71 Prozent Ackerland und 28 Prozent Dauergrünland. Beim Ackerbau hat in Deutschland der Getreideanbau die größte Bedeutung. Dementsprechend haben wir in Deutschland ein großes Potenzial von 8 bis 13 Mio. t Stroh, dass nicht für die Tierhaltung oder Humusproduktion benötigt wird (Weiser et al., 2014). Hinzu kommt ein hohes Potenzial an Grünlandbiomasse aufgrund einer zunehmend intensiveren Erzeugung landwirtschaftlicher Produkte, einer rückläufigen Nutzung von Grünlandbiomasse in der Tierhaltung und des gleichzeitigen europaweiten Verbots der Umwidmung von Grünland zu Ackerland (UBA, 2018; DAFA, 2013).

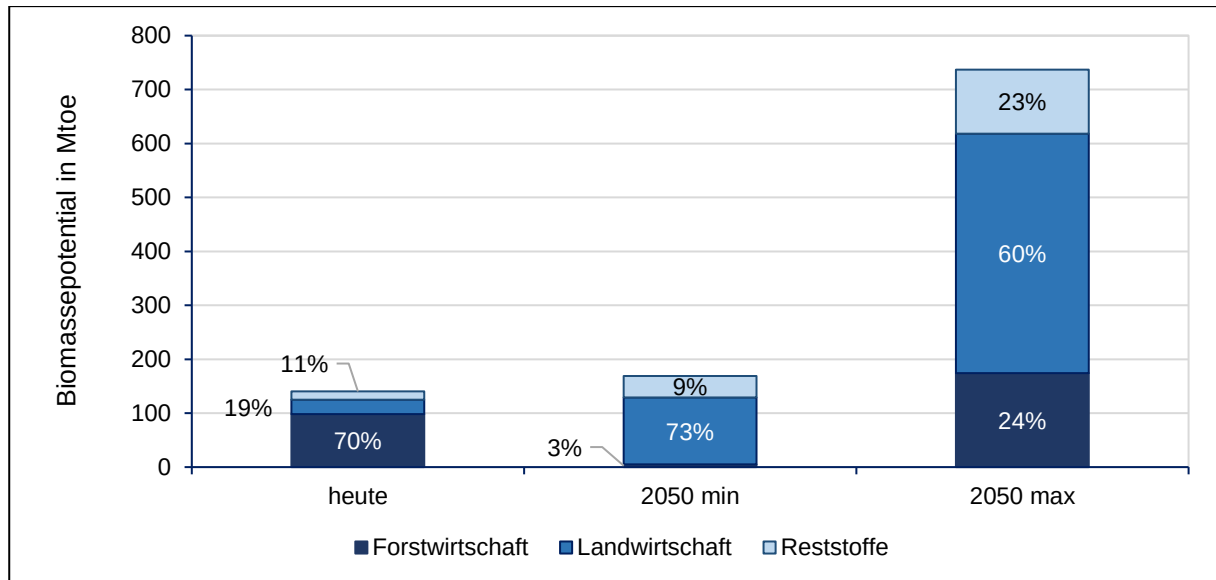


Abbildung 3 Heutige Biomassenutzung Europa (EU28) für den Einsatz im Bioenergiesektor und minimal bzw. maximal Prognose für 2050 (Calderón, 2018)

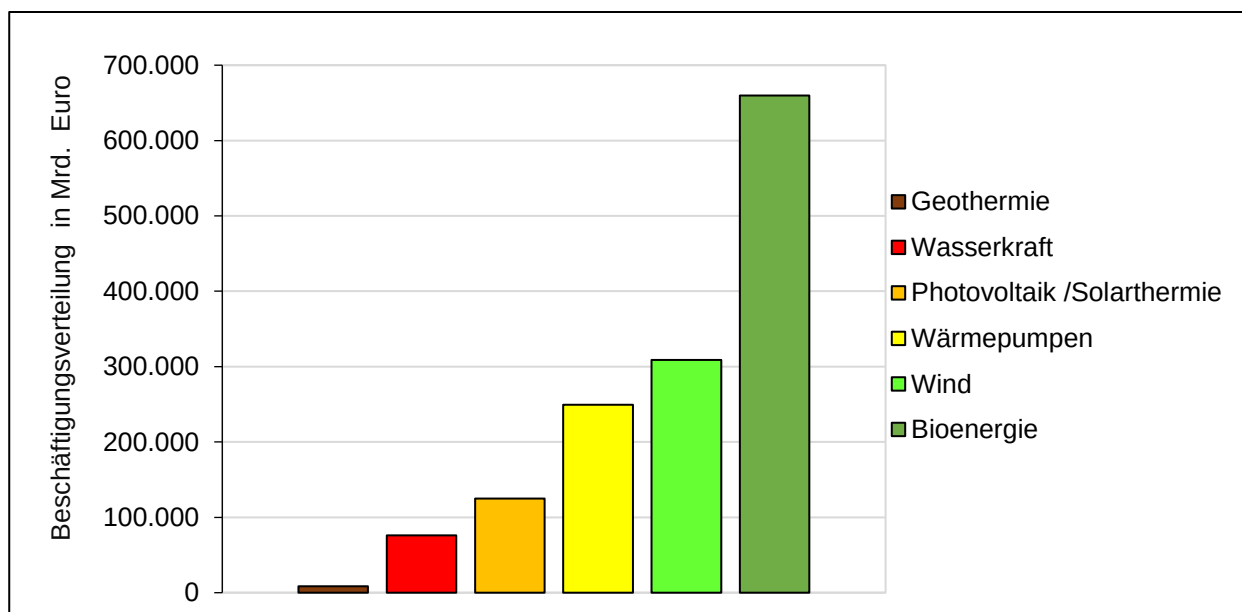


Abbildung 4 Beschäftigungsverteilung im Bereich der erneuerbaren Energien 2016 in Europa und in Milliarden Euro (Calderón, 2018)

Die energetische Verwertung von Heu und Stroh kann die Wertschöpfung in der Landwirtschaft steigern. Bioenergie ist von allen erneuerbaren Energien mit den höchsten Beschäftigungseffekten verbunden (Abbildung 4). Für eine nachhaltige Gestaltung der Bioenergie muss die Humuswirkung des Strohs berücksichtigt werden. Deswegen sollte nur so viel Stroh entnommen werden, wie es die Humusbilanz zulässt.

Stroh und Heu können sowohl in Biogasanlagen als auch in Heizwerken zum Einsatz kommen. Beim Einsatz in Biogasanlagen werden mit Grünlandbiomasse deutlich geringere Biogaserträge im Vergleich zu Mais erzielt. Die Biogaserträge von Stroh bei Verweilzeiten von 30 Tagen entsprechen 70% des Biogasertrags von Mais. In der Regel bedürfen Stroh bzw. Grünlandbiomasse einer Aufbereitung aufgrund ihrer hohen Anteile an schwer oder gar nicht vergärbaren Bestandteilen. Diese Aufbereitungsprozesse sind energie- und kostenintensiv. Deswegen muss erst eine preiswerte und energieeffiziente Methode gefunden werden, bevor Stroh für die Biogasvergärung zum Einsatz kommen kann (Leible et al., 2015; C.A.R.M.E.N e.V., 2016). Demgegenüber kann durch die Nutzung von Stroh und Heu in Heiz(kraft)werken ohne Erfordernis einer energie- und kostenaufwendigen Aufbereitung und mit einem hohen Wirkungsgrad Strom und Wärme erzeugt werden.

3.2 Brennstoffeigenschaften von Stroh und Heu

Stroh und Heu bestehen hauptsächlich aus Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O). Der Heizwert eines Brennstoffs und damit die freiwerdende Energie bei der Oxidation wird weitestgehend vom C-Gehalt bestimmt (Hartmann, 2009). Zudem wird der Heizwert vom Wassergehalt des Brennstoffs beeinflusst, da für dessen Verdampfung Energie benötigt wird. Stroh und Heu weisen geringere C-Gehalte (43 bis 48%) und einen vergleichbaren Wassergehalt (12-20%) zu Holz auf und haben damit auch einen geringeren Heizwert im Vergleich zu Holz (FNR, 2014b).

Tabelle 1: Zusammensetzung der Biomasse und Brennstoffeigenschaften (FNR, 2014b)

	Biomasse					Asche	
	N	Cl	S	K	Heizwert	Gehalt	Erweichungspunkt
	% TM				MJ/kg	%	°C
Weizen	0,48	0,19	0,082	1	17,2	5,7	998
Gerste	0,46	0,4	0,089	1,4	17,5	4,8	980
Raps	0,84	0,47	0,27	0,8	17,1	6,2	1.273
Landschaftspflegeheu	1,14	0,31	0,16	1,5	17,4	5,7	1.061
Weidelgras	1,34	1,39	0,14	1,5	16,5	8,8	-
Rohrglanzgras	1,3	0,6	0,2	-	-	-	1.000
Fichte	0,13	0,005	0,015	0,13	18,8	0,6	1.426

Die Verbrennung von Biomasse gilt als CO₂ neutral, da nur so viel CO₂ freigesetzt wird, wie vorher während des Wachstums gebunden wurde. Daneben enthalten Heu und Stroh Stickstoff (N), Chlor (Cl), Schwefel (S) und Kalium (K) (Tabelle 1), die sich auf den Ausstoß von THG-Emissionen und auf weitere verbrennungsrelevante Eigenschaften auswirken (z.B. Ascheerweichungsverhalten,

Korrosionen im Brennraum). Die hohen Gehalte an N und S erhöhen die Gefahr von NO_x-Emissionen und SO₂-Emissionen (FNR, 2014b). Distickstoffmonoxid (Lachgas) ist ein Treibhausgas, dessen Treibhauswirksamkeit 298-mal so groß ist wie die von CO₂. Zudem sind die Staubemissionen beim Einsatz von Halmgut aufgrund des höheren Aschegehalts im Vergleich zu Holz größer (FNR, 2014b). Diese hohen Aschegehalte führen zudem zu hohen Ascheentsorgungskosten. Die hohen Staub- und THG-Emissionen sind insbesondere für Halmgutheiz(kraft)werke > 0,1 MW problematisch, da hier die strengen Grenzwerte der TA-Luft (2002) eingehalten werden müssen (vgl. Tabelle 2) und damit hohe Kosten für die Technik zur Gasreinigung erforderlich sind.

Stroh und Heu haben aufgrund ihrer hohen K-Konzentrationen einen deutlich niedrigeren Ascheschmelzpunkt im Vergleich zu Holz (Hartmann, 2009; FNR, 2014b). Dies erfordert eine hohe Anforderung an die Anlagentechnik (wassergekühlte und bewegliche Roste) und ist mit einem erheblichen Investitionsbedarf verbunden. Hinzu kommt, dass die hohe Konzentration an Cl und S die Gefahr von Korrosionen steigert und zusammen mit dem niedrigen Ascheerweichungspunkt den Wartungs- und Reparaturaufwand und die damit verbundenen Kosten von Halmgutheizwerken erhöht. Zudem wurde im März 2014 die Überarbeitung der TA Luft von 2002 beschlossen. Ein Referentenentwurf der TA-Luft liegt seit September 2016 (Entwurf TA Luft 09/2016) vor. In diesem Entwurf sind die Grenzwerte für einzelne Anlagengrößen und Schadstoffe im Vergleich zur TA Luft 2002 drastisch reduziert worden und unterschreiten zum Teil die Grenzwerte der „Medium Combustion Plant (MCP) Directive“ vom November 2015. Dies könnte die Neuansiedlung von halmgutbasierten Heizwerken in Deutschland erschweren. Die Einhaltung der Grenzwerte ist für Strohheizwerke möglich, bedarf aber eines hohen technischen Standards und ist deswegen mit hohen Investitionskosten verbunden.

Tabelle 2: Emissionsgrenzwerte für Biomassefeuerungsanlagen, die Stroh oder ähnliche pflanzliche Stoffe einsetzen nach der gültigen TA Luft 2002 und einem Entwurf für die Novellierung der TA-Luft (Entwurf TA Luft 09/2016) bezogen auf einen Sauerstoffwert von 6%.

Feuerungsleistung	MW	TA-Luft 2002		Entwurf TA Luft (9. 2016)	
		0,1 bis 1	1 bis < 50	0,1 bis 1	1 bis < 50
Staub	mg/Nm ³	75	30	20	20 (10)
CO	mg/Nm ³	375	375	150	150
NO _x	mg/Nm ³	750	600	750	500 (300)
Ges.-C	mg/Nm ³	-	-	200	200 (100)

Die Brennstoffqualität von halmgutartiger Biomasse hat laut der Heizwerksbetreiber einen großen Einfluss auf den wirtschaftlichen Betrieb einer Anlage. Neben dem Wassergehalt und der Brennstoffzusammensetzung wird die Brennstoffqualität von im Ballen enthaltenen Störstoffen (z.B. Äste, Steine, Erde) beeinflusst, die insbesondere zu Ausfallzeiten führen.

Damit ist die Nutzung von Stroh und Heu als Brennstoff aufgrund ihrer hohen Konzentrationen an N, Cl, S und K technisch aufwendig und mit hohen Kosten verbunden.

3.3 Planung von einem Halmgutheiz(kraft)werk

Halmgutheiz(kraft)werke sind mit hohen Investitionskosten verbunden (vgl. Abschnitt 3.2) und damit ist eine detaillierte Planung für eine erfolgreiche Projektentwicklung von Halmgutheiz(kraft)werken erforderlich. Folglich ist es sinnvoll frühzeitig mit der Planung zu beginnen. Man kann die Planungsphase in 6 Schritte unterteilen (Fichtner, 2000):

1. In einem ersten Schritt sollte mit Hilfe einer Projektskizze und einer darauf aufbauenden Machbarkeitsstudie die Projektidee konkretisiert und die Realisierungschancen der Projektidee ermittelt werden. In der **Projektskizze** werden Schwachstellen und Ausschlusskriterien identifiziert. Dadurch können rechtzeitig Lösungsansätze gefunden werden oder bei Bedarf ein Projektabbruch erfolgen. Die Projektskizze wird vom Projektinitiator erstellt und beruht auf qualitativen und quantitativen Abschätzungen (FNR, 2014a, b).

In der Machbarkeitsstudie soll festgestellt werden, ob die Projektidee in die Genehmigungsphase übergeht. Die **Machbarkeitsstudie** ist eine ausführliche Risikoabschätzung und beruht auf detaillierten Berechnungen. Bei der Machbarkeitsstudie sollte man Experten (z.B. Planungsbüros) zu Rate ziehen und sich mit Betreibern von bereits bestehenden Halmgutheizwerken austauschen, um Planungsfehler zu vermeiden (FNR, 2014a, b).

In dieser ersten Planungsphase werden allgemeine Projektinformationen, das (vorläufige) technische Konzept und wirtschaftliche Aspekte sowie nicht ökonomische und technische Parameter berücksichtigt (Tabelle 3).

Tabelle 3: Grobgliederung einer Machbarkeitsstudie (FNR 2014b)

Allgemeine Projektinformationen	- Kurzbeschreibung - Vorstellung der Projektbeteiligten - Beschreibung des Projektstandes
Technische Daten	- Festlegung des Anlagenstandortes - Bestimmung des Wärmebedarfs - Brennstofflieferbereitschaft und Bereitstellungswege - Anlagenkonzipierung - Vorkonzipierung der Wärme- und Stromeinspeisung
Ökonomische Aspekte	- Festlegung der wirtschaftlichen Randbedingung - Ermittlung der Basisdaten - Berechnung der Wettbewerbsfähigkeit - Durchführung einer Sensitivitätsanalyse (Optimierung) - Evaluierung der Finanzierung einschließlich der Fördermöglichkeiten

Damit ein Halmgutheizwerk effizient, störungs- und wartungsarm betrieben und eine sichere Versorgung der Verbraucher zu vertretbaren Wärmepreisen gewährleistet werden kann, müssen die technischen Anlagenkomponenten an den Brennstoff und die örtlichen Gegebenheiten angepasst sein.

Die Anlagenkomponenten beinhalten (CARMEN, 2004):

- die Brennstoffzufuhr einschließlich Ballenauflöser,
- das Feuerungssystem beim Brennstoffkessel,
- die Rauchgasreinigungssysteme,
- den Wärmespeicher,
- und bei Heizkraftwerken den Wasser-Dampf-Kreislauf (bzw. Wärmeträgerkreislauf) und das Stromerzeugeraggregat.

Für die technisch möglichen Anlagenvarianten soll die technische Machbarkeit und deren Wettbewerbsfähigkeit mit Alternativanlagen (z.B. Gasheizwerken) geprüft und hinsichtlich technischer und ökonomischer Gesichtspunkte optimiert werden (CARMEN, 2004). Ferner muss bestimmt werden, wer die Anlage bauen und betreiben kann. Dazu gehört die Abschätzung des baulichen Aufwandes sowie ggf. die Vorkonzeption des Nahwärmenetzes (FNR, 2014a, b). Zudem muss das Betreibermodell bestimmt sowie der Bau und die Finanzierung (z.B. Banken, Fördermittel) geklärt werden. Diese erste Phase der Projektfindung und Beurteilung kann im Einzelfall viel Zeit in Anspruch nehmen und sollte mit großer Sorgfalt durchgeführt werden (FNR, 2014a, b).

2. Fällt die Entscheidung für ein Halmgutheiz(kraft)werk, erfolgen als nächste Schritte die Vorplanung, die Entwurfsplanung und die Ausführungsplanung (Realisierungsphase) (FNR, 2014a, b). In der **Vorplanung** wird das technische Konzept der Machbarkeitsstudie konkretisiert (ggf. Festlegung auf eine Variante) und die Angaben zu den einzelnen Kostenpositionen durch Anfragen bei den Komponentenherstellern abgesichert. Die **Entwurfsplanung** enthält die technischen Grundlagen incl. Zeichnungsunterlagen und bildet die Grundlage für einen Genehmigungsantrag. Die **Ausführungsplanung** ist die Grundlage zur Erstellung der Ausschreibungsunterlagen. Damit liegen mit Ende dieser Planungsphase alle Unterlagen für das Genehmigungsverfahren und die Ausschreibungsphase vor (Fichtner, 2000; FNR, 2014a, b).
3. Das Genehmigungsverfahren beginnt mit der Prüfung der Genehmigungsbedürftigkeit. Diese unterscheidet sich in Abhängigkeit von der Größe der Anlage. Bis zu einer Feuerungswärmeleistung von 0,1 MW bedürfen Heizwerke, die Stroh und ähnliche pflanzliche Stoffe als Brennstoffe einsetzen keiner Genehmigung nach dem BImSchG (2002). Das heißt sie sind nicht genehmigungspflichtig nach (BImSchG § 22). Es ist aber ggf. eine Baugenehmigung nach den entsprechenden Vorschriften der einzelnen Bundesländer erforderlich und es sind die Anforderungen der 1. BImSchV (2010) einzuhalten.

Ab einer Feuerungswärmeleistung von >0,1 MW bis zu einer Wärmeleistung >50 MW sind Strohfeuerungsanlagen gemäß §4 des BImSchG (2002) genehmigungspflichtig. Diese Anlagen bedürfen ein Genehmigungsverfahren nach der 4. BImSchV (2017) und müssen die Anforderungen der TA Luft einhalten. Die Grundsätze des Verfahrens sind in der 9. BImSchV geregelt und diese Verordnung klärt damit den Ablauf des Genehmigungsverfahrens. In der Regel kann ein vereinfachtes Verfahren nach §19 des BImSchG (2002) durchgeführt werden.

In der TA-Luft sind die Anforderungen an die Luftreinhaltung wie die Abgasreinigung und Emissionsüberwachung geregelt. Die Genehmigung nach BImSchG schließt behördliche Entscheidungen wie die Baugenehmigung und oder die Erlaubnis nach Betriebssicherheitsordnung mit ein. Separate Verfahren sind die Planfeststellung, Verfahren nach Energiewirtschaftsgesetz (Heizkraftwerke) und die Umweltverträglichkeitsprüfung nach dem UVPG (2012).

Tabelle 4: Rechtsvorschriften für das Genehmigungsverfahren nach BImSchG für Halmgutheizwerke im Leistungsbereich 0,1 MW bis < 50MW.

Gesetz/Verordnung/ Vorschrift	Paragraph/ Nr.	Titel bzw. Regelungsinhalt
BImSchG	§ 4	Genehmigungsbedürftige Anlagen
	§ 5	Pflichten der Betreiber genehmigungsbedürftiger Anlagen
	§ 10	Förmliches Genehmigungsverfahren
	§ 19	Vereinfachtes Genehmigungsverfahren
BImSchV	4.	Verordnung über Genehmigungsbedürftige Anlagen (Genehmigungserfordernis)
	9.	Allgemeine Vorschriften (Ablauf des Genehmigungsverfahrens)
TA Luft		Anforderungen an die Luftreinhaltung (Emissionsgrenzwerte)
UVPG		Prüfung der Umweltverträglichkeit

Alle für die Genehmigung von Halmgutheizwerken mit einer Feuerungswärmeleistung von 0,1 MW – 50 MW relevanten Regelwerke sind in der Tabelle 4 zusammengefasst. Ab einer Feuerungswärmeleistung >50 MW erfolgt das Genehmigungsverfahren nach der 13. BImSchV (2013).

4. Mit Erteilung der Genehmigungsbescheide kann unter Berücksichtigung der Nebenbestimmungen mit der **Ausschreibungsphase** begonnen werden. Die Ausschreibungsphase beinhaltet die Erarbeitung der Ausschreibungsunterlagen, Prüfung und Vergleich der Angebote und die Vergabe (FNR, 2014a, b).
5. In der Phase der **Projektentwicklung** erfolgen die Montage der Anlage, die Einarbeitung des zukünftigen Betriebspersonals, die Inbetriebnahme, der Probetrieb und endet mit der Abnahme. Insbesondere eine frühzeitige Einarbeitung des Betriebspersonals ist von großer Bedeutung, da die Halmgutheizwerke störanfällig sind und damit bei Betriebsfehlern hohe Ausfallzeiten zu verzeichnen sind (FNR, 2014a, b).
6. Der **Anlagenbetrieb**.

Detaillierte Informationen zur Planung und Realisierung von Halmgutheizwerken findet man im Dachleitfaden Bioenergie „Grundlagen und Planung von Bioenergieprojekten“ (FNR, 2014), im Leitfaden feste Biobrennstoffe (FNR, 2014) und bei C.A.R.M.E.N. e.V.

Die Planung und Genehmigung von Stroh- und Heuheiz(kraft)werken ist aufwendig und damit mit einem hohen Zeitbedarf verbunden.

4 Material & Methoden

In diesem Forschungs- und Entwicklungsvorhaben wurden die treibhausgasrelevanten und die Wirtschaftlichkeit betreffenden Daten sowie der technische Aufbau von vier halmgutbasierten Heizwerken in Rahmen einer Befragung erfasst. Die Heizwerke hatten eine Nennleistung von ca. 600 bis 900 kW. Zudem wurde ein Heizkraftwerk mit einer Nennleistung von ca. 50 MW betrachtet. In dem Vorhaben wurde die gesamte Wertschöpfungskette berücksichtigt (Abbildung 5). Diese beinhaltet die Bereiche Brennstoffbereitstellung - Verbrennung/Konversion - Wärmenutzung - Aschenutzung /Kreislaufwirtschaft. Zur Untersuchung des Bereichs Brennstoffbereitstellung wurde ein Lohnunternehmen/Logistikunternehmen befragt, dass sowohl die Heu- und Strohbergung als auch den Transport als Leistung anbietet. Außerdem wurde ein Heizwerkbetreiber mit eigener Strohbergbereitstellung hinsichtlich der Brennstoffbereitstellung befragt.

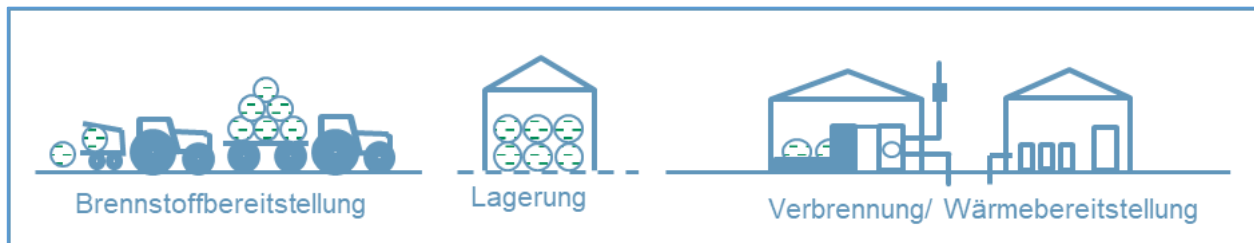


Abbildung 5 Wertschöpfungskette

4.1 Brennstoffbereitstellung

Die Daten zur Brennstoffbereitstellung wurden im Rahmen der Befragung eines Lohnunternehmens erhoben. Zudem wurde die Brennstoffbereitstellung mit Eigenmechanisierung mit dem KTBL-Feldrechner berechnet. Bei der Strohbergung werden die Etablierungs- und Pflegemaßnahmen dem Hauptprodukt Korn angerechnet. Es werden die Verfahrensschritte Pressen und Transport sowie die Umschlagprozesse (Ballensammeln, Laden und Entladen, Ein- und Auslagerung) berücksichtigt. Die durch die Strohentnahme erforderliche Ersatzdüngung wird anhand der Nährstoffpreise je kg Reinnährstoff für Stickstoff, Phosphor, Kalium, Magnesium, Schwefel sowie den Kohlenstoffwert für die entgangene Humusbildung in Anlehnung an den Strohpreisrechner der Landwirtschaftskammer Niedersachsen berechnet (LWK NI, 2018).

Bei der Strohbergbereitstellung wurde von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Schlaggröße 20 ha
- Transportweg 20 km
- 130-kW-Mechanisierung
- Ertrag 3,5 t TM/ha bzw. 2,5 t TM/ha



Abbildung 6 Verfahrensschritte der Heubereitstellung

Bei der Heubergung wird davon ausgegangen, dass das Heu auf extensiv bewirtschaftetem Grünland mit einmaliger Mahd produziert wird. Auf diesen Flächen erfolgen weder Pflegemaßnahmen noch eine Düngung. Diese Flächen wurden vor der Nutzung zur Brennstoffproduktion gemulcht. Es besteht also keine Konkurrenz zu anderen Nutzungsalternativen (z.B. Tierproduktion). Bei der Heubergung werden alle Verfahrensschritte von der Mahd, über das Trocknen bis zum Transport berücksichtigt (Abbildung 6).

Bei der Bereitstellung von Heu wurden folgende Annahmen getroffen:

- Schlaggröße 20 ha
- Transportweg 40 km
- 67-kW-Mechanisierung,
- Ertrag 2,1 t TM/ha
- extensive Bewirtschaftung.

Die Mechanisierung in den einzelnen Verfahrensschritten bei der Heu- bzw. Strohbergung für die Berechnung der Brennstoffbereitstellungskosten mit dem KTBL-Feldrechner sind der Tabelle 5 zu entnehmen.

Tabelle 5: Mechanisierungsgrad in den einzelnen Verfahrensschritten nach dem KTBL-Feldrechner

Verfahrensschritte	Heu	Stroh
Mähen	Mähaufbereiter (2,4 m; 45 kW)	-
4 x Wenden	Kreiselzettwender (4,5 m; 45 kW)	-
Schwaden	Schwader (3,5 m; 45 kW)	-
Pressen	Rundballenpresse (1,2 m; 205 kg/Ballen; 45kW)	Quaderballen (120x90x220cm, 330 kg/Ballen Stroh; 120 kW)
Ballentransport	Lohnunternehmen	Lohnunternehmen

4.2 Wärmebereitstellung

Die untersuchten Halmgutheizwerke unterschieden sich ihren Konzepten wie dem eingesetzten Brennstoff, der Nennleistungen, der Auslastung und in der Infrastruktur (Nahwärmenetz und Lagerart) (Tabelle 6). Zudem wurde ein Strohheizkraftwerk mit einer Nennleistung von 50 MW untersucht das sowohl Wärme als auch Dampf und Strom bereitstellt.

Auf Grundlage der Praxisdaten wurden ein Modellheizwerk und Modellheizkraftwerk entwickelt, dass die Realität widerspiegelt, ohne Rückschlüsse auf die einzelnen Praxisbetriebe ziehen zu können. Zudem wurden unterschiedliche Betriebsweisen und Standortbedingungen angenommen. Bei der Betriebsweise wurden von zwei unterschiedlichen Auslastungen der Anlage (1.750 h/a und 5.000 h/a) ausgegangen. Zudem wurde der Effekt der unterschiedlichen Brennstoffe (Stroh, Heu) auf die Wirtschaftlichkeit und die THG-Emissionen untersucht. Hinsichtlich der Standortbedingungen lag ein Schwerpunkt auf der Untersuchung des Effektes der Infrastrukturellen Bedingungen (z.B. Neubau oder Einspeisung in ein vorhandenes Nahwärmenetz, Nutzung von Altgebäuden für Lagerung des Brennstoffs) auf die Wirtschaftlichkeit des Halmgutheizwerkes. Ein weiterer Schwerpunkt den

Standort betreffend war die Brennstoffverfügbarkeit in der Region und die damit verbunden Kosten für den Transport der Biomasse. Anhand der Modellheiz(kraft)werke wurde die Wirtschaftlichkeit und THG-Vermeidungspotential bestimmt und die Einflussfaktoren auf diese ermittelt. Die Ergebnisse wurden abschließend mit Hilfe der Praxisdaten validiert.

Tabelle 6: Kenndaten der untersuchten Heizwerke

Kenndaten	Einheit	HW-1	HW-2	HW-3	HW-4
Nennleistung	MW	900	595	800	900
Wärmeproduktion	MWh/a	1.600	1.000	4.000	1.500
Auslastung	h/a	1.800	1.800	5.000	1.500
Brennstoffart		Stroh	Stroh	Heu ¹⁾	Heu ²⁾
Brennstoffmenge	t/a	500	330	1.000	500
Lager		Neubau	Altbau	Altbau	Leichtbau
Nahwärmenetz		Neubau		Einspeisung in einvorhandenes Netz	

1) Paludibiomasse, 2) Landschaftspflegeheu

4.2.1 Modellheizwerk

Im Folgenden werden die Verfahrensschritte von der Brennstoffeinlagerung bis hin zur Wärmeverteilung einschließlich der Anlagenkonfiguration des Modellheizwerkes beschrieben. Das Modellheizwerk hat eine Nennleistung von 800 kW. Die Einlagerung des Brennstoffs wird durch einen externen Lieferanten gewährleistet. Die Auslagerung bzw. die Bestückung der Brennstoffzuführung des Heizwerks erfolgt mit einem Teleskoplader.

Tabelle 7: Kennzahlen des Modellheizwerkes

Kenndaten	Einheit	Modellheizwerk		Gasheizwerk	
Variante		I	II	I	II
Nennleistung	kW	800	800	1.200	1.200
Auslastung	h/a	1.750	5.000	1.750	5.000
Wärmeproduktion	MWh/a	1.400	4.000	1.400	4.000
Brennstoffmenge	t/a (m ³)	520	1.200	224.000	640.000
Aschemenge	t/a	45	100	-	-
Strombedarf	kWh/a	34.000	65.000	5.833	16.666
Arbeitskraftbedarf	Akh/a	500	1000	500	1000

Bei der Brennstoffzufuhr handelt es sich um ein Transportband mit Kratzkette und Ballenauflöser. Dabei muss das Ballengarn nach Ablage auf das Band per Hand entfernt werden. Im Brennraum befindet sich ein beweglicher und wassergekühlter Vorschubrost mit Zuführung zur Aschemulde. Die Rauchgasreinigung erfolgt über Rauchgas-Zyklonabscheider mit nachfolgendem Rauchgastaschenfilter. Die Rost- und Filterasche wird vollautomatisch mittels Ascheschnecke in zwei separate, außerhalb des Heizhauses stehende Container befördert. Die Rostasche wird Gülle beigemischt und als Dünger auf den landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht. Die Wärmeübertragung im Kessel erfolgt über Rauchgaszüge und die Wärmeübertragung von dem Pufferspeicher (24.000 l) zum Nahwärmenetz über Plattenwärmetauscher.

Die technischen Kennzahlen sind in der Tabelle 7 dargestellt. Dieses Modellheizwerk wird unterteilt in zwei Betriebsweisen. Bei der Betriebsweise I arbeitet das Heizwerk mit einer geringen Auslastung (1.750 Vollaststunden im Jahr) und bei der Betriebsweise II mit einer hohen Auslastung (5.000 Vollaststunden im Jahr).

Tabelle 8: Wirtschaftliche Kennzahlen vom Modellheizwerk

Position	Einheit	Modellheizwerk	Gasheizwerk
Kapitalgebundene Kosten			
Investitionskosten	Euro	650.000	61.660
Planung	Euro	28.000	-***
Instandsetzung	Euro	8.500	700
Nutzung	a	20	20
Zinssatz	%	3	3
Förderung	%	28	-
Betriebsgebundene Kosten			
Verwaltung	Euro/a	6.000	500
Personal	Euro/h	15,00	15,00
Versicherung	Euro/a	2.500	2.600
Verbrauchsgebundene Kosten			
Brennstoff	Euro/MWh bzw. Euro/m ³	20	58
Hilfsstoffe	Euro/a	400* / 800**	400* / 800**
Strom	Euro/kWh	0,17	0,17
Asche	Euro/t	60,00	-

* Variante I, ** Variante II, *** in den Investitionskosten enthalten

Zudem werden folgende Parameter variiert:

- Brennstoffart: Heu, Stroh
- Brennstoffkosten: 40 Euro/t ... 200 Euro/t
- Regionale Brennstoffverfügbarkeit: Transportentfernung 1 km ... 200 km
- Lagerhalle: Festbau (Altbau, sanierter Altbau, Neubau) versus Leichtbauhalle:
 - Lagervolumen: 4.000 m³
 - Nutzungsdauer: 20 Jahre
 - Versicherung: 2.000 Euro/a
- Nahwärmenetz: vorhanden, Teilneubau (800 m), Neubau (1300m)
- Honorierung der Klimaschutzleistung: (20 Euro/t CO₂-Äquivalent ... 80 Euro/t CO₂-Äquivalent)

In der Tabelle 8 sind die für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung relevanten Daten vom Modellheizwerk dargestellt anhand derer die Berechnung durchgeführt wurde.

4.2.2 Modellheizkraftwerk

Das Modellheizkraftwerk wird mit Strohquaderballen betrieben. In dem Lager am Heizwerk können bis zu 1.000 Tonnen Stroh für die Bedarfsdeckung von bis zu 5 Tagen eingelagert werden. Damit ist die Überbrückung von Sonn- und Feiertagen gewährleistet. Das Stroh wird von den Strohlieferanten zwischengelagert und sukzessive zum Lager des Strohheizkraftwerks transportiert. In der Strohlagerhalle am Heizwerk werden immer 6 Ballen gleichzeitig ein- und ausgelagert. Beim Einlagerungsvorgang mittels der Prozesskrananlage wird automatisch das Gewicht der Ballen, deren Abmessungen sowie der Wassergehalt erfasst, damit über die Strohqualität Einfluss auf den Verbrennungsprozess genommen werden kann.

Die Auslagerung und Bestückung der Strohförderketten erfolgt ebenfalls voll automatisch mittels der Prozesskrananlage. Am Ende der Strohförderkette befinden sich ein Schnurschneider und ein Ballenauflöser. Nach den Ballenauflösern fällt das lose Brennmaterial in den Fallschacht und wird über waagerechte Stokerschnecken in den Kessel transportiert. Das lose Stroh verbrennt im Kessel auf einem speziellen wassergekühlten Vibrationsrost.

Die bei der Verbrennung entstehende Wärme wird im ersten Schritt über die Kesselwandungen zum Verdampfen des Speisewassers genutzt. Eine Trennung von Speisewasser und Dampf erfolgt in der Kesseltrommel. In den nachgeschalteten Überhitzern wird die Überhitzung des Dampfes auf die Frischdampf Temperatur von 522°C gewährleistet. Außerdem werden die bei der Dampferzeugung und Überhitzung abgekühlten Rauchgase genutzt, um zunächst das Speisewasser über einen Wärmeaustauscher bis nahe dem Sättigungszustand zu erwärmen und im Weiteren über Luftvorwärmer die Verbrennungsluft zu erhitzen.

Die Rauchgasreinigungsanlage besteht aus einem Trockensorptionsverfahren mit nachgeschalteten Gewebefiltern. Es erfolgt erst eine Eindüsung von Calciumhydroxid Ca(OH)₂ und anschließend werden die gebundenen Schadstoffe über den Gewebefilter abgeschieden. Das Rauchgas wird als gereinigtes Abgas über den Abgaskamin ins Freie abgeführt. Der Dampf aus dem Kessel wird zur geregelten Wärmeentnahme und zur Stromerzeugung der Turbine zugeführt, die mit dem Generator verbunden ist. Zum Zwecke der Kraft-Wärme-Kopplung ist die Dampfturbine mit Anzapfungen zur Auskopplung von Prozess- und Nahwärme sowie mit einer geregelten Entnahme für Prozessdampf ausgerüstet. Der Prozessdampf wird außerdem über eine Dampfleitung in einem nahegelegenen Unternehmen der Nahrungsmittelindustrie genutzt. Mit dem Heizkraftwerk werden zu 30% Strom und zu 60% Wärme produziert. Durch die gekoppelte Strom- und Wärmeproduktion kann bis zu 90% der Primärenergie in Nutzenergie umgewandelt werden.

Tabelle 9: Wirtschaftliche Kennzahlen vom Modellheizkraftwerk

Position	Einheit	Modellheizkraftwerk
Kapitalgebundene Kosten		
Investitionskosten	Euro	80.000.000
Nutzung	a	20
Zinssatz	%	3
Wartung/ Instandhaltung	Euro/a	350.000
Betriebsgebundene Kosten		
Personalkosten	Euro/a	1.500.000
Versicherung	Euro/a	250.000
Verbrauchsgebundene Kosten		
Brennstoffkosten	Euro/a	6.000.000
Labor/ Analysen	Euro/a	5.000
Entsorgung Filterasche	Euro/a	1.000.000

4.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

4.3.1 Brennstoffbereitstellungskosten

Mit einer Deckungsbeitragsrechnung wurden die Brennstoffbereitstellungskosten berechnet. Dabei wurden die proportionalen variablen Kosten den Erlösen für den jeweiligen Produktionsumfang gegenübergestellt. Dies ermöglicht eine Planungsrechnung für unterschiedliche Produktionsmenge und die Übertragung der Ergebnisse auf unterschiedliche Betriebe (Annen, 2017). Die Brennstoffkosten wurden zum einen anhand der Preise des Lohnunternehmens für die einzelnen Verfahrensschritte der Strohbergung bzw. der Heuernte berechnet. Die Kosten der Heubereitstellung bei Eigenmechanisierung wurden für die einzelnen Verfahrensschritte dem Feldarbeitsrechner der KTBL entnommen. Die Strohbergung wurde mit der Strohdüngung verglichen. Diese wurde anhand des Nährstoffwertes vom Stroh berechnet. Dazu wurde der Nährstoffgehalt (N, K, P, K, Ca, C) des Strohs mit den Kosten für eine Ersatzdüngung multipliziert (LWK NI, 2018). Die Kosten für die Heuernte wurden den Kosten für Mulchen gegenübergestellt.

4.3.2 Wärmegestehungskosten

Im ersten Schritt wurde eine Investitionsrechnung durchgeführt, indem alle Kosten dem jährlichen Erlös gegenübergestellt wurden. Dazu wurden die einmalig zu Beginn anfallenden Investitionskosten für die Anlagenkomponenten des Heizwerks, für das Lager und gegebenenfalls für das Nahwärmenetz mit Hilfe der Annuitätenformel in eine durchschnittliche jährliche Zahlung umgerechnet.

Annuitätenformel (VDI 2067):

$$A = \text{Investitionskosten} \times \frac{i \times (1+i)^T}{(1+i)^T - 1}$$

A: Annuität, i: kalkulatorischer Zinssatz, kalkulatorische Betrachtungszeit.

Im zweiten Schritt wurde die Kostenstruktur der 5 Heiz(kraft)werke erfasst. Dazu wurden die Gesamtkosten gemäß VDI 2067 unterteilt in:

- Kapitalgebundene Kosten (z.B. Investitionskosten für Heizkessel und Gebäude, Instandhaltungskosten)
- Verbrauchsgebundene Kosten (z.B. Brennstoffe, Hilfsenergie, Ascheentsorgung)
- Betriebsgebundene Kosten (z.B. Löhne, Emissionsmessungen, Wartungsverträge, Versicherung)

Die Kostenstruktur der halmgutbasierten Modellheiz(kraft)werke wurde im Vergleich zu einem Erdgas basierte Heizwerk als Referenz betrachtet. Die Wirtschaftlichkeitsdaten zum Gasheizwerk basieren auf ein als Redundanz für ein Biomasseheizwerk fungierendes Gasheizwerk.

4.3.3 Sensitivitätsanalyse

Mit der Sensitivitätsanalyse kann aufgezeigt werden, wie sehr die Wirtschaftlichkeit von den Einflussfaktoren verändert wird (Siebertz et al., 2010).

Dazu wurde der Effekt der Steigerung eines Einflussfaktors um 20% auf das Betriebsergebnis (BE) des Modellheizwerkes im Vergleich zu einem Referenzwert berechnet (Tabelle 10):

- Auslastung
- Brennstoffpreis
- Wärmepreis
- Förderung.

Die Veränderung des Betriebsergebnisses wurde berechnet, indem das Betriebsergebnis nach Variation der Referenzwerte um 20% ($BE_{20\%}$) vom Betriebsergebnis basierend auf den Referenzwert ($BE_{Ref.}$) subtrahiert bzw. addiert wurde:

$$\text{Veränderung } BE = BE_{Ref.} \pm BE_{20\%}$$

Tabelle 10: Referenzwert der Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit

Einflussfaktor	Einheit	Referenzwert
Auslastung	%	50
Brennstoffpreis	€/t	80
Wärmepreis	€/MWh	55
Förderung	%	30

Außerdem wurden der Standort bzw. das Vorhandensein von Infrastruktur berücksichtigt. Grundlage war auch hier das Modellheizwerk, dem drei unterschiedliche Szenarien unterstellt wurden. Beim Referenzszenario war am Standort des Modellheizwerkes ein Altbau für die Lagerung vorhanden und die Einspeisung der Wärme erfolgte in ein bereits bestehendes Nahwärmenetz. Bei den Variationsszenarien wurden ein neues Festlager gebaut sowie ein Nahwärmenetz teilweise (800 m³) bzw. vollständig (1.300 m³) neugebaut.

4.4 Treibhausgasbilanz

Die THG-Bilanz entlang der Wertschöpfungskette von den halmgutbasierten Heizwerken wurde im Rahmen des Vorhabens eingehend beleuchtet. Die Zielstellung der THG-Bilanzierung ist die Erfassung und Bewertung von THG-Emissionen, die im Verlauf des Lebensweges des Bioenergieträgers von der Rohstoffproduktion über die Rohstoffbereitstellung bis zur Wärmebereitstellung entstehen. Dabei wurden die THG-Emissionen, die bei der Nutzung von Halmgut in Heizwerken bzw. Heizkraftwerken entstehen, mit denen aus der fossilen Energiebereitstellung verglichen. Die mit den einzelnen Verfahrensschritten der Brennstoffbereitstellung und der energetischen Umwandlung verbundenen THG-Emissionen wurden anhand von Inputdaten und den Emissionsfaktoren nach Biograce II berechnet (Biograce II, 2015).

$$THG\text{-Emission} = \text{Inputdaten} \times \text{Emissionsfaktor}$$

Die Inputdaten wurden im Rahmen der Befragungen von den Praxisbetrieben erfasst. Bei der Bereitstellung beinhalten die Inputdaten den Dieserverbrauch bei den einzelnen Verfahrensschritten (z.B. Pressen, Transport, Umschlag) sowie den Nährstoffentzug durch die Strohentnahme (Brennstoff) und bei der energetischen Umwandlung die direkten Emissionen (insb. NO_x) und die benötigte Hilfsenergie (Tabelle 11).

Tabelle 11: Emissionsfaktoren nach Biograce II (Biograce II, 2015)

Input	Einheit	Emissionsfaktor
Brennstoffbereitstellung		
Diesel	g CO ₂ Äqui./MJ	93,95
N-Dünger (kg N)	g CO ₂ /kg	4.567,85
P-Dünger (kg P ₂ O ₅)	g CO ₂ /kg	1.176,08
K-Dünger (kg K ₂ O)	g CO ₂ /kg	635,66
Energetische Umwandlung		
Direkte Emissionen	g CO ₂ Äqui./MJ	0,2264
Hilfsenergie (Strom)	g CO ₂ Äqui./MJ	196,35
Fossiles Referenzsystem		
Strom	g CO _{2,eq} /MJ _{elek.}	186
Fossil Energieträger (Wärme)	g CO _{2,eq} /MJ _{Wärme}	80

Die Emissionsfaktoren von Biograce II wurden genutzt, um die Input-Daten in THG-Emissionen umzurechnen (Biograce II, 2015), da diese Werte nach der „Renewable energy directive“ der EU harmonisiert wurden und damit einen Europaweiten Vergleich der THG-Bilanz ermöglicht (Fehrenbach et al., 2016). Bilanziert wurden die THG-Emissionen für die eingesetzten Materialien (Rohstoffe + Hilfsstoffe) in den einzelnen Verfahrensschritten, während die THG-Emissionen für die Herstellung der Anlagen und Ausrüstungen unberücksichtigt geblieben sind. Die THG-Bilanzierung der Brennstoffbereitstellung unterscheidet sich für die Brennstoffe Heu und Stroh.

Für die Strohbergung werden alle Verfahrensschritte vom Pressen über die Vorkonzentration, Umschlagprozesse, Transport und Lagerung berücksichtigt. Hier werden alle Verfahrensschritte für die Etablierung und Pflege dem Korn als Hauptprodukt angerechnet. Lediglich der Nährstoffentzug (einschließlich C) durch die Strohentnahme wird berücksichtigt. Dabei wird eine Nährstoffkompensationsdüngung in Höhe des Nährstoffentzugs durch die Strohentnahme angerechnet. Bei der Heubereitstellung werden zusätzlich zu den Verfahrensschritten, die bei der Strohbergung genannt sind, noch die Mahd und die Heutrocknung auf dem Feld (Schwaden und Wenden) berücksichtigt. Die Berechnung wurde für extensiv bewirtschaftetes Grünland durchgeführt. Es findet auf diesen Flächen weder eine Düngung noch andere Pflegemaßnahmen statt und deswegen wird keine Nährstoffentzugsdüngung berücksichtigt.

Tabelle 12: Inputfaktoren für die einzelnen Verfahrensschritte der Heu- und Strohbereitstellung

Inputfaktoren	Einheit	Heu	Stroh
Dieselbedarf- Verfahrensschritte			
Mahd	l/t	1,97	-
Wenden	l/t	2,79	-
Schwaden	l/t	0,93	-
Pressen	l/t	3,02	0,86
Vorkonzentration	l/t	1,72	1,06
Umschlagprozesse	l/t	0,56	0,34
Transport	l/t km	0,35	0,35
Ersatzdüngung			
N	kg N/t	-	5
P	kg P/t	-	3
K	kg K/t	-	14
entgangene C-Speicherung im Boden	kg C/t FM	-	100

Mit Hilfe des Dieselvebrauchs wurden die THG-Emissionen der einzelnen Verfahrensschritte berechnet. Die durch die Strohentnahme erforderliche Nährstoffkompensation wurde mittels der THG-Emissionen ermittelt, die mit der Düngemittelherstellung verbunden sind. Die Höhe der Inputdaten für die einzelnen Verfahrensschritte entlang der Wertschöpfungskette sind in der Tabelle 12 in Abhängigkeit vom eingesetzten Brennstoff dargestellt.

Die potentiell entgangene C-Speicherung im Boden durch die Strohentnahme wurde mit folgender Formel anhand der Humusbilanz-Daten der VDLUFA (mittlerer Wert) berechnet (DBFZ, 2012):

$$a = Bb \times HRPL \times UF / JWB$$

a: Entgangener CO₂-Speicherung im Boden durch Strohentnahme

Bb: Brennstoffbedarf in t/a

HRPL Humusreproduktionsleistung Brennstoff

UF: Umrechnungsfaktor C in CO₂ nach Summenformel = 3,67

JWB: jährliche Wärmebereitstellung in MJ/a

Für die energetische Verwertung wurden die direkten Emissionen bei der Verbrennung als auch der Bedarf an Strom für das Heizwerk berücksichtigt. Als fossile Referenz wurde ein Europäischer Durchschnittswert für den eingesetzten fossilen Brennstoff für die Erzeugung von Wärme (Erdgas) und Strom (50% Kohle und 50% Erdgas) gewählt.

Das THG-Vermeidungspotenzial im Vergleich zum fossilen Referenzsystem wurde mit folgender Formel berechnet (Fehrenbach et al., 2016):

$$THG\text{-Vermeidungspotenzial} = \frac{THG_{Rf} - THG_{BE}}{THG_{Rf}}$$

THG_{Rf} = Gesamtemissionen des fossilen Referenzenergieträgers

THG_{BE} = Gesamtemissionen beim Einsatz von Biomasse

5 Ökonomische Analyse

Im folgenden Abschnitt wird aufgrund der größeren Datengrundlage der Schwerpunkt auf Halmgutheizwerke gelegt. Die Halmgutheizkraftwerke werden im Abschnitt 5.3 behandelt.

5.1 Kostenstruktur der Halmgutheizwerke

Die Kostenstruktur eines Halmgutheizwerkes wurde für eine Auslastung des Modellheizwerkes von 1.750 h/a (ca. 20%) und 5.000 h/a (ca. 57%) ermittelt (Abbildung 7), da in diesem Bereich die Auslastung der untersuchten Praxisbetreiber lag. Die Kostenstruktur des Modellheizwerkes spiegelt damit den Ist-Zustand der Halmgutheizwerke in Deutschland wider.

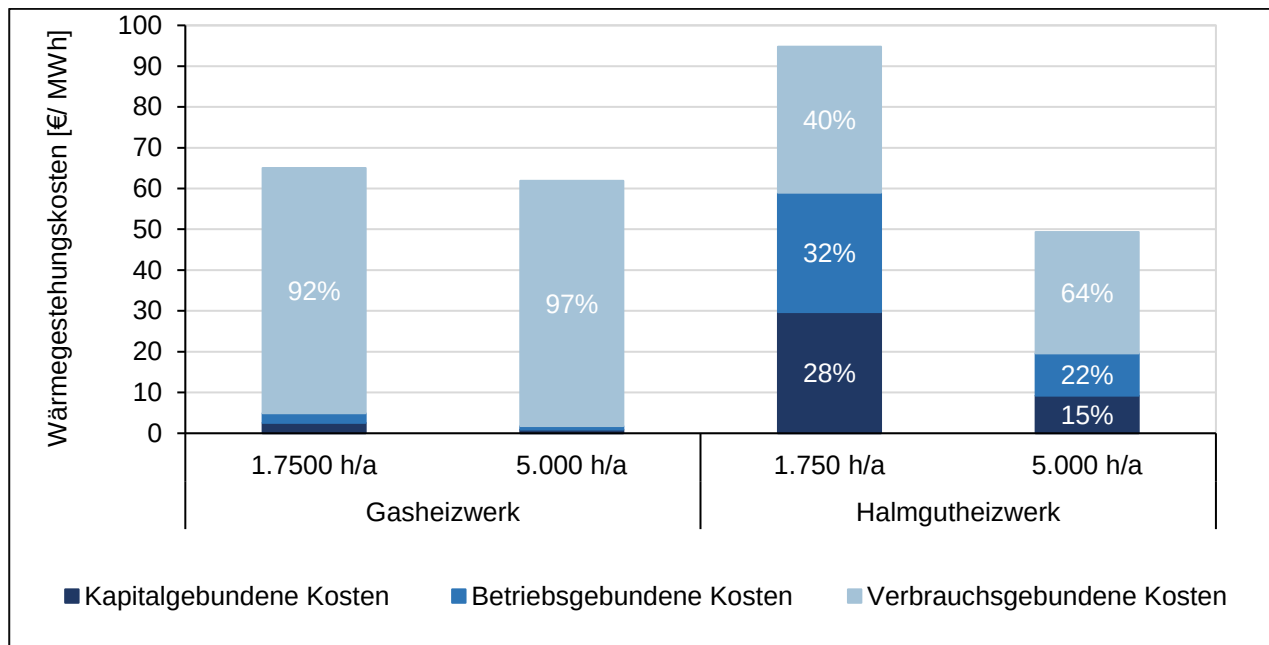


Abbildung 7 Kostenstruktur von Halmgutheizwerken im Vergleich zu Gasheizwerken und in Abhängigkeit von der Auslastung (1.750 h, 5.000 h)

Dabei wird deutlich, dass sich die Kostenstruktur von einem Halmgutheizwerk von dem eines Gasheizwerks deutlich unterscheidet. Bei einem Gasheizwerk werden die Wärmegestehungskosten maßgeblich von dem Brennstoffpreis bestimmt. Die Wärmegestehungskosten von einem Halmgutheizwerk werden neben den verbrauchsgebundenen Kosten maßgeblich von den kapitalgebundenen und den betriebsgebundenen Kosten bestimmt. Aufgrund der Brennstoffeigenschaften von halmgutartigen Biomasse sind die Anforderungen an den Brennraum und die Abgasreinigung sowie der Reparatur- bzw. Reinigungsbedarf der Anlage höher im Vergleich zu Gasheizwerken (vgl. Kapitel 3.2). Damit verbunden sind höhere Investitions- und Instandhaltungskosten (Reinigung und Reparatur). Aus diesem Grund hat bei einem Halmgutheizwerk die Auslastung einen höheren Effekt auf die Wärmegestehungskosten im Vergleich zu einem Gasheizwerk. Von einem Halmgutheizwerk sinken die Wärmegestehungskosten um 42% bei einer Auslastung von 5.000 h/a im Vergleich zu einer Auslastung von 1.750 h/a. Bei einem Gasheizwerk beträgt die Differenz nur 5%. Bei einer geringen Auslastung ist ein Halmgutheizwerk nicht wettbewerbsfähig mit einem Gasheizwerk. Bei der hohen Auslastung hat ein Halmgutheizwerk dagegen einen Wettbewerbsvorteil.

5.2 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse hat ergeben, dass der Wärmepreis, die Auslastung, die Brennstoffkosten und die Förderung den größten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Halmgutheizwerke haben. Dabei nimmt der Effekt dieser Einflussfaktoren auf das Betriebsergebnis in folgender Reihenfolge ab: Wärmepreisentwicklung = Auslastung > Standortwahl > Brennstoffpreisentwicklung (Abbildung 8).

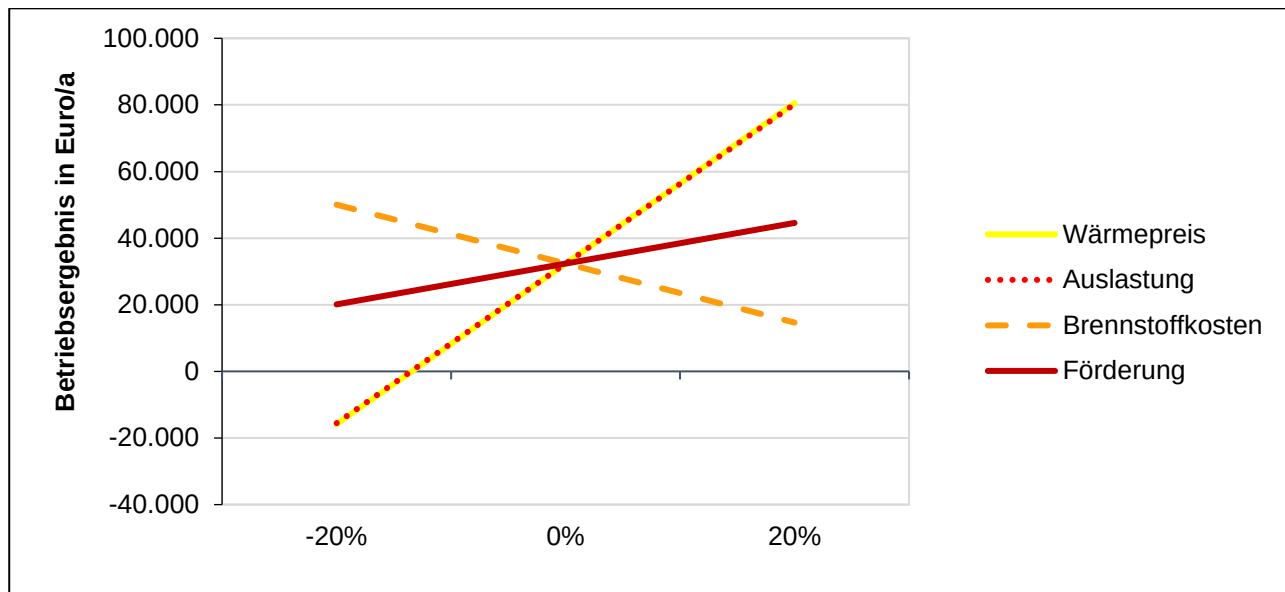


Abbildung 8 Veränderung des Betriebsergebnisses durch die Veränderung des Wärmepreises, der Auslastung, des Brennstoffpreises und der Förderhöhe um 20%

5.2.1 Wärmepreis

Der Wärmepreis setzt sich aus einem Leistungspreis (auch Grundpreis genannt), einem verbrauchsabhängigen Arbeitspreis und einem jährlich einmalig zu zahlenden Messpreis zusammen. Der Leistungspreis dient zur Abdeckung der Fixkosten. Beim Arbeitspreis handelt es sich um die verbrauchsgebundenen Kosten, die direkt von der bereitgestellten Wärmemenge abhängen.

Der Wärmepreis sollte in einem Wärmeliefervertrag vereinbart werden. Dabei sind die Bestimmungen der „Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Fernwärme (AVBFernwärmeV) zu berücksichtigen. Der Begriff Fernwärme ist hier definiert als die Versorgung Dritter unabhängig von der Netzleistung und schließt damit auch Nahwärmenetze mit ein (Topp, 2009). In einem Wärmeliefervertrag sollten folgende Punkte geklärt sein (FNR, 2014a):

- Liefer- und Abnahmeverpflichtungen
- Vergütungsregelungen (mindestens Höhe der Wärmegestehungskosten)
- Vertragsdauer (mindestens 5 Jahre)
- Messverfahren
- Sonstige kommerzielle Bedingungen (z.B. Kündigungsfristen)

Damit das Heizwerk wirtschaftlich betrieben werden kann, muss der Wärmepreis mindestens so hoch sein wie die Wärmegestehungskosten. Die Zahlungsbereitschaft eines Wärmeverbrauchers für Wärme aus Biomasse liegt dabei in der Höhe des Preises von Wärme aus fossilen Energieträgern. Der in der Planung berücksichtigte Wärmepreis sollte sich am Gaspreis orientieren. Der Gaspreis wird dabei von vielen Faktoren beeinflusst wie z.B. allgemeine Marktentwicklung, Wirtschaftswachstum, Klimatrends, technologische Entwicklungen. Vor dem Hintergrund sich

ständig ändernder Marktentwicklungen ist eine Prognose zur Gaspreisentwicklung nur schwer möglich (BMWI, 2016). Derzeit ist der Gaspreis vergleichsweise gering und liegt für einen Privathaushalt bei ca. 60 Euro pro MWh, für Industrie zwischen 25 und 30 Euro/MWh (BMWI, 2019)

5.2.2 Auslastung

Die Auslastung hat einen großen Einfluss auf die Wärmegestehungskosten eines Halmgutheizwerkes. In der Abbildung 9 sind die Wärmegestehungskosten von einem Halmgutheizwerk in Abhängigkeit von seiner Auslastung im Vergleich zum Gaspreis für Haushalte und Industrie dargestellt. Ein Halmgutheizwerk erreicht erst ab einer Auslastung von 40% eine Wettbewerbsgleichheit mit dem Gaspreis für Haushalte (ca. 60 - 70 Euro/MWh; BMWI, 2019) (Abbildung 9).

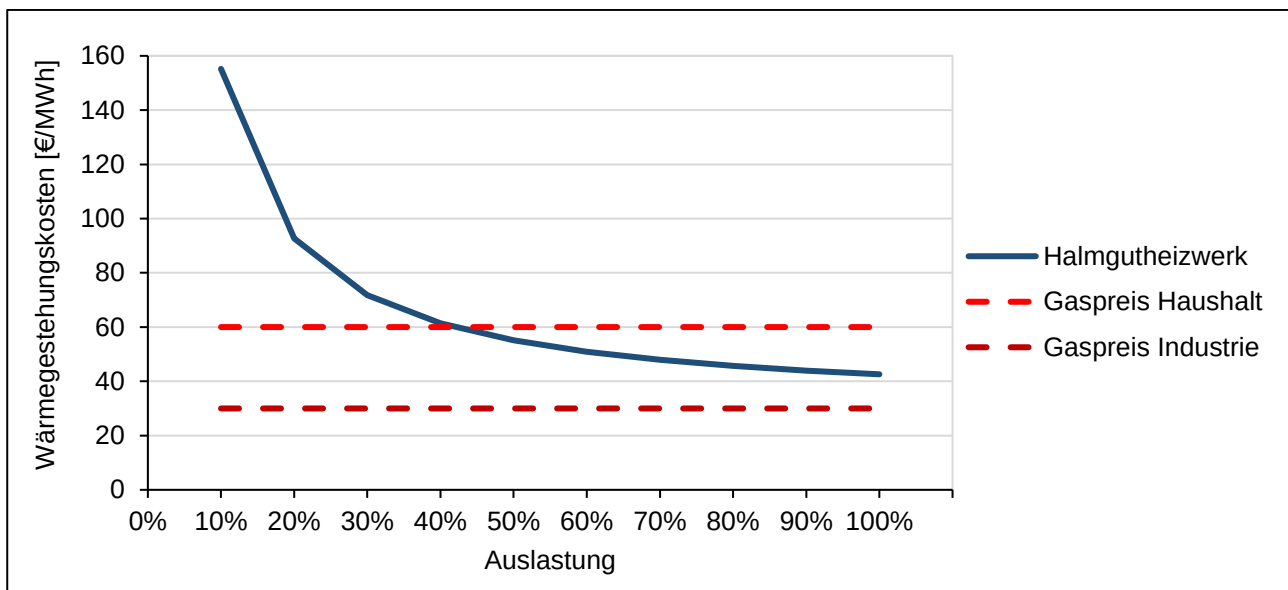


Abbildung 9 Wärmegestehungskosten von einem Halmgutheizwerk in Abhängigkeit von der Auslastung und im Vergleich zum Gaspreis für Haushalte, Gewerbe und Industrie

Die Gaspreise für Industrie (ca. 25 bis 30 Euro/MWh; BMWI, 2019) sind deutlich niedriger. Damit sollte die Auslastung eines Halmgutheizwerkes über 50% liegen, um wettbewerbsfähig mit einem Gaspreismix für Industrie und Privathaushalte sein zu können. Dies verdeutlicht die Wichtigkeit der Bestimmung des Wärmebedarfs und der Zahlungsbereitschaft für die abzunehmende Wärme in der frühen Planungsphase.

Für einen wirtschaftlichen Betrieb eines Halmgutheizwerkes sind deswegen Wärmeabnehmer mit einem ganzjährigen hohen Wärmebedarf und einer hohen räumlichen Dichte erforderlich:

- Öffentliche Einrichtungen (Schwimmbäder, Schulen, Krankenhäuser),
- Betriebe (Molkereien, Schlachthöfe und landwirtschaftliche Betriebe mit Sauenhaltung) und
- Mehrfamilienhäuser.

Demgegenüber sind ländliche Strukturen, die häufig aus Siedlungen mit Privathaushalten mit einer großen räumlichen Distanz gekennzeichnet sind, nur bedingt geeignet. Privathaushalte haben im Winter einen hohen Raumwärmebedarf, während im Sommer kaum Raumwärme benötigt wird. Demgegenüber hat ein landwirtschaftlicher Betrieb mit Tierhaltung (900 Sauen) einen ganzjährigen hohen Raumwärmebedarf (Abbildung 10). Im ländlichen Raum sollten deswegen auch Abnehmer mit hohen ganzjährigen Wärmebedarf am Halmgutheizwerk angeschlossen sein, um eine Wettbewerbsfähigkeit zu einem Gasheizwerk gewährleisten zu können.

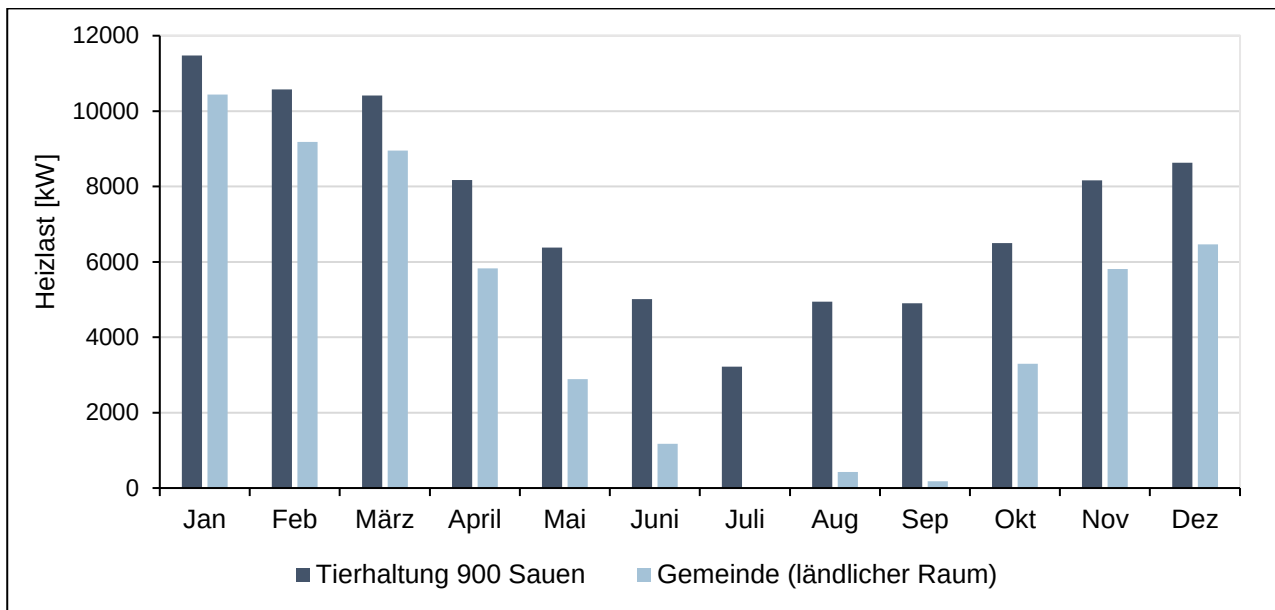


Abbildung 10 Heizlast zur Bereitstellung von Raumwärme für eine Gemeinde (Bürogebäude, Gewächshaus, Bauhof) im Vergleich zu einem landwirtschaftlichen Betrieb mit Tierhaltung (900 Sauen) (Dietze und Heilmann, 2010)

Mit Hilfe einer Jahresdauerlinie wird der Wärmeleistungsbedarf von einem Wärmeabnehmer für ein Jahr dargestellt. Dabei werden der Raumwärme- und der Warmwasserbedarf sowie Wärmeverteilterverluste berücksichtigt (Nussbaum et al., 2017). In der Abbildung 11 ist eine charakteristische Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs für einen Privathaushalt dargestellt.

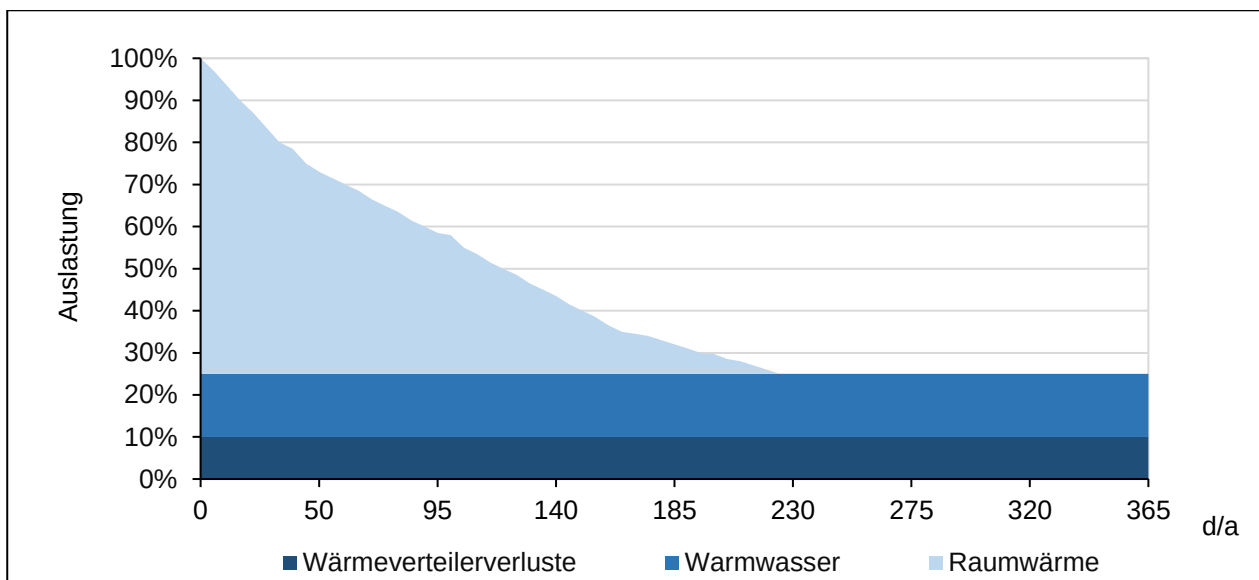


Abbildung 11 Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs einer Gesamtanlage unterteilt in Wärmeverluste, Warmwasser und Raumwärme (Nussbaum et al., 2017).

Die Jahresdauerlinie dient als Basis für die Dimensionierung eines Halmgutheizwerkes und kann anhand von tatsächlichen Messdaten berechnet oder durch Vergleich mit ähnlichen Gebäudestrukturen ermittelt werden (Nussbaum et al., 2017). Die Fläche unter der Jahresbedarfslinie stellt den Wärmebedarf dar und ist unterteilt in Wärmeverteilungsverluste, Warmwasser und Raumwärme. Die Raumwärme hat den größten Anteil an dem

Gesamtwärmebedarf und wird stark von dem jeweiligen Abnehmer und der Witterung beeinflusst (vgl. Abbildung 10). Im Winter ist der Wärmebedarf sehr hoch, während er zum Sommer abnimmt. Dies verdeutlicht, wie wichtig die Abnehmerstruktur für die Wahl des Standortes für ein Halmgutheizwerk ist.

Zum Erzielen einer möglichst hohen Auslastung sollte ein Halmgutheizwerk nur die Grundlast decken. Zur Deckung der Spitzenlast sollte ein Gasheizwerk eingesetzt werden, da hier die Wärmegestehungskosten maßgeblich vom Brennstoffpreis bestimmt werden und damit nur eingeschränkt von der Auslastung abhängen.

5.2.3 Brennstoffpreis

Der Brennstoffpreis hat einen geringeren Anteil an den Wärmegestehungskosten im Vergleich zu einem Gasheizwerk. In der Sensitivitätsanalyse konnte gezeigt werden, dass Wärmegestehungskosten vom Brennstoffpreis beeinflusst werden (Abbildung 8). In der Abbildung 12 sind die Wärmegestehungskosten von einem Halmgutheizwerk in Abhängigkeit vom Brennstoffpreis bei einer Auslastung von 50% (ca. 4.300 h/a) und 60% (5.200 h/a) dargestellt. Diese sind einem Wärmepreis von 50 Euro/MWh bzw. 58 Euro/MWh gegenübergestellt. Dies entspricht dem Wärmepreis, den die Praxisbetriebe für die Einspeisung ihrer Wärme erhalten haben. Unter diesen Voraussetzungen darf der Brennstoffpreis bei einer Auslastung des Modell-Halmgutheizwerkes von 60% zwischen 80 und 110 Euro/t und bei einer Auslastung von 50% zwischen 60 und 90 Euro/t liegen, damit die Wärmegestehungskosten gedeckt werden können.

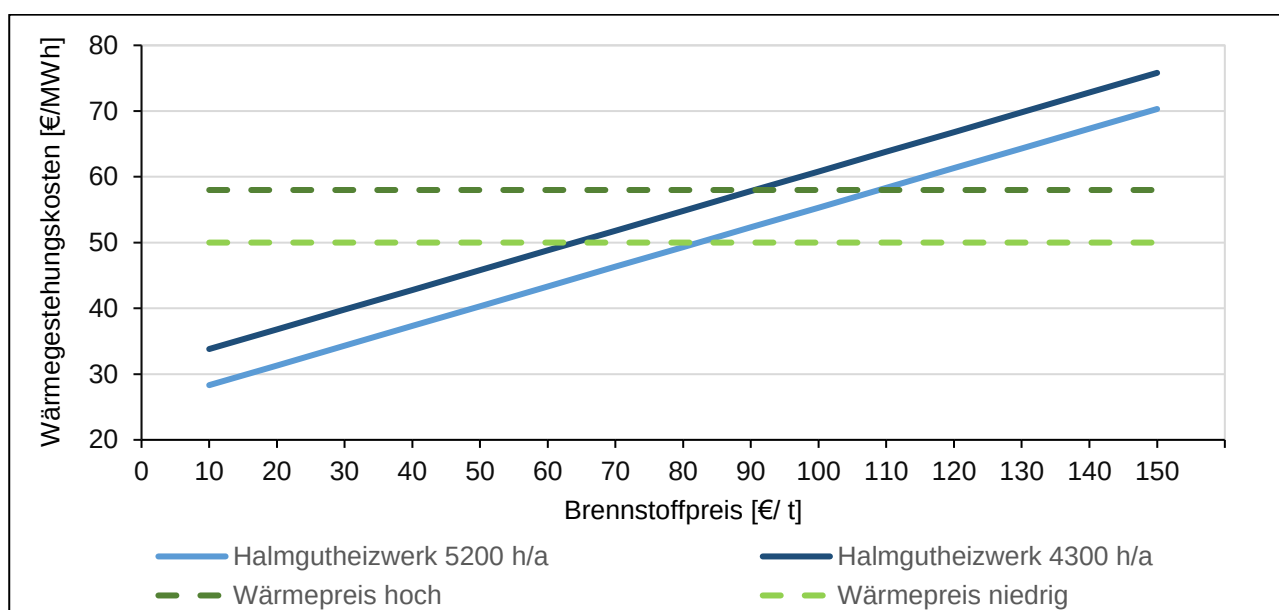


Abbildung 12 Wärmegestehungskosten in Abhängigkeit vom Brennstoffpreis und im Vergleich zum Wärmepreis (niedrig und hoch)

5.2.3.1 Marktpreis für Heu und Stroh

In der Abbildung 13 ist der durchschnittliche Marktpreis für Heu und Stroh von Januar 2015 bis Dezember 2018 im Vergleich zum Erdgaspreis in Deutschland dargestellt. Der Preis ist in Euro/MWh angegeben, um die unterschiedlichen Brennstoffe miteinander vergleichen zu können. Der Strohpreis liegt bei durchschnittlich 20 Euro/MWh. Das entspricht einem Preis von ca. 80 Euro/t. Der Heupreis liegt etwas höher bei ca. 30 Euro/MWh bzw. ca. 115 Euro/t. Damit liegen der Stroh- und Heupreis deutlich unter dem Erdgaspreis.

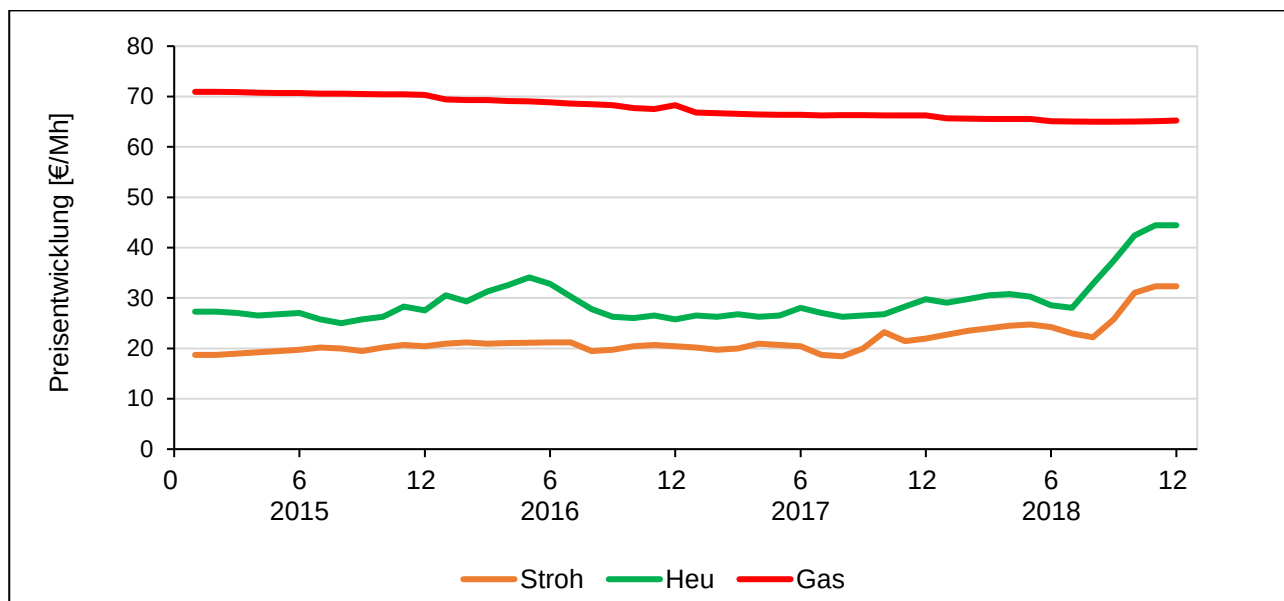


Abbildung 13 Preisentwicklung von Stroh und Heu im Vergleich zu Erdgas in Deutschland für den Zeitraum 2015 bis September 2018 (Quelle Stroh und Heupreis: Zinke, 2019; Gaspreis: BMWI, 2019)

Der Stroh- und der Heupreis schwankten im Zeitraum von 2015 bis 2018 in Abhängigkeit von der Witterung. So führten die Trockenheit und die damit verbundene niedrigeren Erträge im Jahr 2018 zu einem starken Preisanstieg für Stroh und Heu.

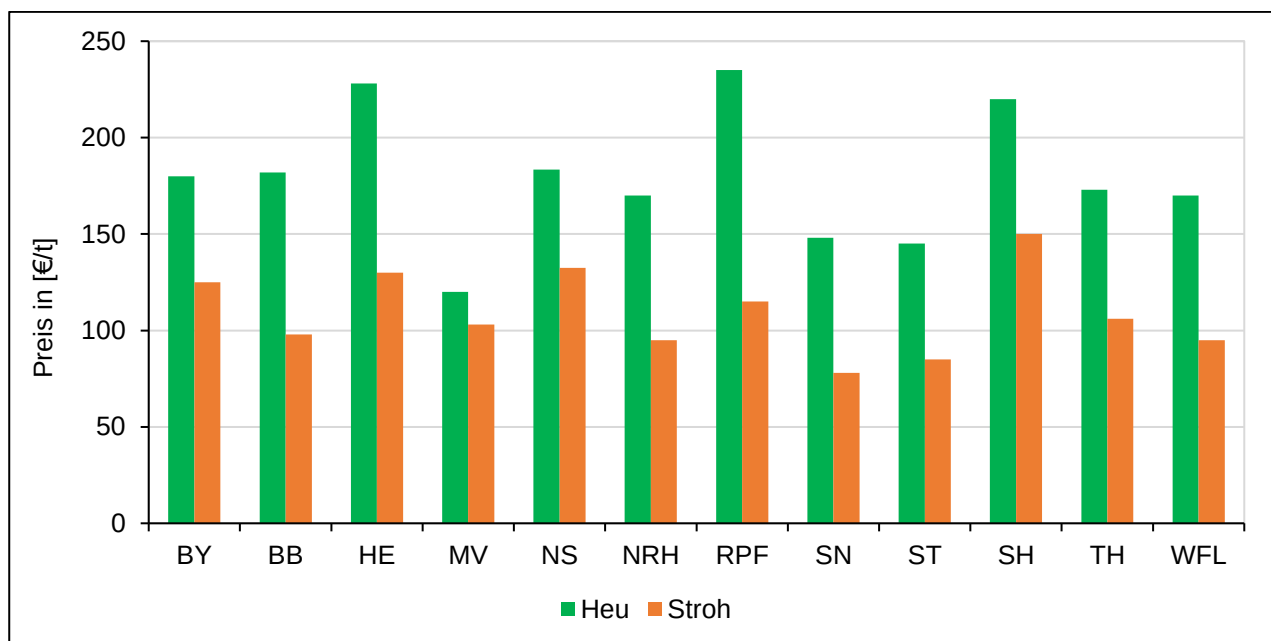


Abbildung 14 Marktpreis von Stroh und Heu nach Bundesland und Region im Februar 2019 (Zinke, 2019)

Zudem sind der Stroh- und Heupreis regional unterschiedlich (Abbildung 14). Dabei wird der Preis von dem Bedarf an Heu und Stroh in einer Region wie z.B. für die Tierproduktion oder Humusreproduktion beeinflusst. Aus diesem Grund ist die Nutzung von Heu und Stroh nicht in jeder Region aus wirtschaftlicher Sicht lohnenswert.

Der durchschnittliche Marktpreis für Stroh liegt in einem Bereich, den ein Heizwerksbetreiber bezahlen kann (vgl. Abbildung 12). Anders verhält es sich beim Marktpreis für Heu, der über dem Preis liegt, den Halmgutheizwerksbetreiber zahlen können. Hinzu kommt, dass der Marktpreis für Stroh und Heu hohen Schwankungen unterliegt, diese Schwankungen muss ein Halmgutheizwerksbetreiber kompensieren können. Ein Marktpreisanstieg von Heu und Stroh über einen längeren Zeitraum, kann die Wirtschaftlichkeit von einem Halmgutheizwerk damit deutlich reduzieren.

5.2.3.2 Herstellungskosten für Stroh

Die Herstellungskosten von Stroh und Heu werden im Folgenden für die Arbeitserledigung durch ein Lohnunternehmen im Vergleich zur Eigenmechanisierung betrachtet. Bei der Eigenmechanisierung wird davon ausgegangen, dass die Maschinen für die Strohbergung bzw. Heuernte bereits vorhanden sind. Aus diesem Grund wurde zur Berechnung des Deckungsbeitrags nur die proportional variablen Kosten der einzelnen Verfahrensschritte berücksichtigt und dem Erlös gegenübergestellt (Tabelle 13). Zudem wurde der Nährstoffwert des Strohs in Höhe von 69,30 Euro/t berücksichtigt. Es wurde von einem Preis für das Stroh in Höhe von 75 Euro/t ausgegangen. Dies entspricht dem Preis, den die Heizwerksbetreiber (Praxisbetriebe) den Landwirten bezahlt haben. Der Deckungsbetrag der Strohbergung beträgt bei Eigenmechanisierung rund 165 Euro/ha. Bei Eigenmechanisierung lohnt sich folglich die Strohbergung gegenüber einer Einarbeitung des Strohs im Boden (Strohdüngung).

Tabelle 13: Strohbereitstellung: Deckungsbeitrag bei Eigenmechanisierung (KTBL, 2018)

	ME	Eigenmechanisierung
Ertrag	t/ha	3,5
Erlös (Preis: 75 Euro/t)	Euro/ha	262,50
Proportionale variable Kosten		
Pressen	Euro/ha	21,37
Umschlag/ Transport	Euro/ha	6,62
Nährstoffwert des Strohs	Euro/ha	69,30
Deckungsbeitrag	Euro/ha	165,21

Eine Neuanschaffung von Maschinen zur Strohbergung lohnt sich erst bei einer hohen Auslastung der Maschinen. Die Arbeitserledigung durch ein Lohnunternehmen kann damit gegenüber der Eigenmechanisierung unter bestimmten Voraussetzungen einen Vorteil haben.

Bei Arbeitserledigung durch ein Lohnunternehmen wurden die Arbeitserledigungskosten einschließlich des Nährstoffwertes des Strohs vom Erlös abgezogen. Dies entspricht dem Betriebsergebnis. Das Betriebsergebnis bei Arbeitserledigung durch ein Lohnunternehmen liegt bei rund 59 Euro/ha (Tabelle 14) und damit ist auch die Strohbergung durch ein Lohnunternehmen lohnenswert gegenüber einer Strohdüngung.

Die Strohbereitstellungskosten unter Berücksichtigung der Maschinenkosten wurden im Rahmen der Befragung von einem Betreiber eines Strohheizwerks (hauptberuflich Landwirt) ermittelt, der Stroh für sein eigenes Strohheizwerk bereitstellt. Diese lagen bei rund 50,50 Euro/t. Dies entspricht

den Angaben anderer Untersuchungen, wo die Strohbergungskosten zwischen 43,70 Euro/t und 51,80 Euro/t liegen (DBFZ, 2012; FNR, 2014). Diese Strohbereitstellungskosten bei Arbeitserledigung durch ein Lohnunternehmen liegen mit rund 58,20 Euro/t über den Kosten durch Eigenmechanisierung.

Tabelle 14: Strohbereitstellung. Betriebsergebnis bei Arbeitserledigung durch ein Lohnunternehmen

	ME	Lohnunternehmen
Ertrag	t/ha	3,5
Erlös (Preis: 75 Euro/t)	Euro/ha	262,50
Arbeitserledigungskosten		
Pressen	Euro/ha	88,50
Umschlag/ Transport	Euro/ha	45,79
Nährstoffwert des Strohs	Euro/ha	69,30
Betriebsergebnis	Euro/ha	58,86

Die Strohbereitstellung lohnt sich gegenüber einer Strohdüngung unabhängig, ob die Strohbergung durch Eigenmechanisierung oder ein Lohnunternehmen erfolgt. Generell kann damit durch die Nutzung von Stroh als Brennstoff die Wertschöpfung im ländlichen Raum gesteigert werden. Dabei muss aber berücksichtigt werden, dass ein Gleichgewicht zwischen Humusentnahme und Humusreproduktion bestehen bleiben muss. Eine zu hohe Strohentnahme wirkt sich negativ auf die Bodenfruchtbarkeit aus und damit auch auf die Produktivität von Ackerflächen. Dies würde langfristig den positiven Effekt einer Strohnutzung umkehren und zu einer Senkung der Wertschöpfung im ländlichen Raum führen.

5.2.3.3 Herstellungskosten für Heu

Derzeit fehlen insbesondere für extensiv bewirtschaftetes Grünland Nutzungsalternativen. Dauergrünland darf aber nicht einfach in Ackerland umgewandelt werden, da es zu den artenreichsten Lebensräumen der Agrarlandschaft zählt und eine wichtige Bedeutung für den Boden-, Wasser-, Biotop- und Artenschutz hat. Bei der Heuernte für die energetische Nutzung wird deswegen davon ausgegangen, dass die Grünlandfläche extensiv bewirtschaftet wird und vor dieser Nutzung gemulcht wurde. Dies hat zum Ziel eine Nutzungsalternative für extensiv bewirtschaftete Grünlandflächen aufzuzeigen und zum anderen eine Nutzungskonkurrenz mit der Tierproduktion auszuschließen. Die Heuernte wurde einmal bei Eigenmechanisierung und bei Ernte durch ein Lohnunternehmen ermittelt. Beim Heu wurden keine Kosten für den Nährstoffentzug berechnet, da dieser zur Steigerung der Biodiversität beitragen kann und damit einen gewünschten Zweck hat (Neurauter et al., 2014). Wie oben beschrieben liegt der Preis, den Heizwerkbetreiber für das Heu zahlen, unter dem Marktpreis. Hier wird von einem Heupreis in Höhe von 80 Euro/t ausgegangen, da dieser von den Heizwerksbetreibern der Praxisbetriebe für Heu durchschnittlich gezahlt wurde.

Tabelle 15: Heuernte: Deckungsbeitrag bei Eigenmechanisierung (KTBL, 2018)

	ME	Eigenmechanisierung
Ertrag	t/ha	2,1
Erlös (Preis 80 Euro/t)	Euro/ ha	168,00
Maschinenkosten		
Mähen	Euro/ha	12,29
4 x Wenden	Euro/ha	32,84
Schwaden	Euro/ha	19,02
Pressen	Euro/ha	17,02
Ballentransport	Euro/ ha	21,59
Deckungsbetrag	Euro/ha	65,24

Dem Deckungsbeitrag von 65 Euro/ha für eine Heuernte bei Eigenmechanisierung stehen Kosten für das Mulchen in Höhe von 22,88 Euro/ha gegenüber (Tabelle 16). Damit ist die Heuernte bei Eigenmechanisierung trotz des niedrigen Preises für Heu lohnenswert im Vergleich zum Mulchen.

Tabelle 16: Heuernte: Betriebsergebnis bei Arbeitserledigung durch ein Lohnunternehmen

	ME	Lohnunternehmen
Ertrag	t/ha	2,1
Erlös (Preis 80 Euro/t)	Euro/ ha	168,00
Maschinenkosten		
Mähen	Euro/ha	44,03
4 x Wenden	Euro/ha	88,06
Schwaden	Euro/ha	44,35
Pressen	Euro/ha	46,44
Ballensammeln	Euro/ha	8,38
Ballentransport	Euro/ha	16,62
Betriebsergebnis	Euro/ha	-54,88

Bei der Heuernte durch ein Lohnunternehmen übersteigen die Kosten der Arbeitserledigung den Erlös um -54,88 Euro/ha. Für das Mulchen fallen bei Arbeitserledigung durch ein Lohnunternehmen

Kosten in Höhe von 44,80 Euro/ha an. Die Heuernte ist damit teurer als das Mulchen und damit nicht lohnenswert, wenn die Arbeitserledigung von einem Lohnunternehmen durchgeführt wird.

Allerdings ist die extensive Dauergrünlandnutzung als Agrarumweltmaßnahme förderfähig. Die Anforderung an die Prämienzahlung und die Höhe des Prämienatzes unterscheiden sich dabei nach Bundesland. Im Folgenden werden die Anforderung für eine Prämienzahlung sowie die Höhe der Prämienzahlung am Beispiel Mecklenburg-Vorpommern (Förderperiode 2015 bis 2020) dargestellt.

In Mecklenburg-Vorpommern können Prämienzahlung nur in Anspruch genommen werden, wenn u.a.:

- keine Ausbringung von Pflanzenschutzmittel erfolgt,
- mindestens eine einmalige Nutzung im Jahr stattfindet (Mulchen ist nicht zulässig),
- keine wendende oder lockernde Bodenbearbeitungen durchgeführt wird und
- keine mineralisches N enthaltenden Dünger eingesetzt werden.

Dabei wird zwischen zwei Varianten (Variante I, II) unterschieden. Für beide Varianten gelten die oben genannten Anforderungen. Zusätzlich dürfen bei Variante II keine Pflegemaßnahmen (z.B. Walzen, Schleppen, Striegeln) durchgeführt werden und eine Düngung mit P, K, Mg, Kalk und Mikronährstoffen darf nur auf Antrag erfolgen. Variante I dürfen nur konventionell wirtschaftende Betriebe in Anspruch nehmen. Die Variante II dürfen ebenfalls konventionell wirtschaftende Betriebe in Anspruch nehmen. Hier besteht aber zusätzlich die Möglichkeit zur Kombination der Prämienätze mit dem ökologischen Landbau bei abgesenktem Fördersatz. Die Höhe der Prämienätze liegt in Abhängigkeit von der Variante zwischen 105 und 220 Euro/ha (Tabelle 17).

Tabelle 17: Varianten und Prämienätze der extensiven Bewirtschaftung von Dauergrünlandflächen in Mecklenburg-Vorpommern

Variante	Prämienatz Euro/ha
Variante I (nur für konventionell wirtschaftende Betriebe)	105
Variante II (konventionell wirtschaftende Betriebe)	220
Variante II (ökologisch wirtschaftende Betriebe)	175

Die Heuernte durch ein Lohnunternehmen lohnt sich nur unter Voraussetzung einer Prämienzahlung. Demgegenüber ist eine Heuernte mit Eigenmechanisierung unabhängig von der Prämie lohnenswert im Vergleich zum Mulchen.

5.2.3.4 Brennstoffqualität

Die Brennstoffqualität von halmgutartiger Biomasse hat laut der Heizwerkbetreiber einen großen Einfluss auf den wirtschaftlichen Betrieb einer Anlage. Dabei wird die Qualität des Brennstoffs von dem Wassergehalt, der Brennstoffzusammensetzung und der in den Ballen enthaltenden Störstoffe (z.B. Äste, Steine, Erde) beeinflusst. Auf den Wassergehalt nehmen alle an dem Projekt beteiligten Heizwerkbetreiber Einfluss. Es werden nur Strohballen mit einem Wassergehalt unter 15% angenommen. Auf die Faktoren Brennstoffzusammensetzung und den Anteil an Störstoffen in den Ballen kann bei innerbetrieblicher Brennstoffbereitstellung ein höherer Einfluss genommen werden als beim Zukauf von Brennstoff. Dies soll am Beispiel eines Strohheizwerkes mit eigener Strohbereitstellung im folgenden Abschnitt verdeutlicht werden.

Der Betreiber des Strohheizwerkes produziert sein Stroh im eigenen Betrieb. Durch eine höhere Schnitthöhe sowie das Auslassen von Randbereichen (z.B. Wald) senkt er den Anteil an Störstoffen. Zudem belässt er das Stroh nach der Ernte noch mehrere Tage zur Nährstoffauswaschung auf dem Feld. Dabei können die Gehalte an K (bis zu 40%) und Cl (bis zu 50%) erheblich gesenkt werden, während die Gehalte an N und S nur geringfügig beeinflusst werden (Dahms et al. 2017; Dietze und Heilmann, 2010). Die Reduktion von K wirkt sich steigernd auf den Ascheschmelzpunkt aus und kann damit zur Vermeidung von Verschlackungen im Brennraum beitragen (FNR, 2014b). Zudem kann durch die Reduktion von Cl die Gefahr einer Hochtemperaturkorrosion und die Emission von HCl vermindert werden.

5.2.3.5 Transportkosten

Die Transportkosten sind insbesondere bei dem derzeitigen hohen Marktpreis für Stroh und Heu ein wichtiger Einflussfaktor auf die Wettbewerbsfähigkeit von Halmgutheizwerken mit Gasheizwerken. Die Transportkosten werden vom Transportweg und von der eingesetzten Transporttechnik beeinflusst (Abbildung 15).

Die Wettbewerbsfähigkeit von einem LKW mit einem Schlepper wird vom Anschaffungspreis, der Auslastung sowie dem Dieselverbrauch und Zeitbedarf für den Transport bestimmt. Die Auslastung ist bei einem Schlepper durch seine vielseitigen Einsatzmöglichkeiten im Regelfall größer als bei einem LKW.

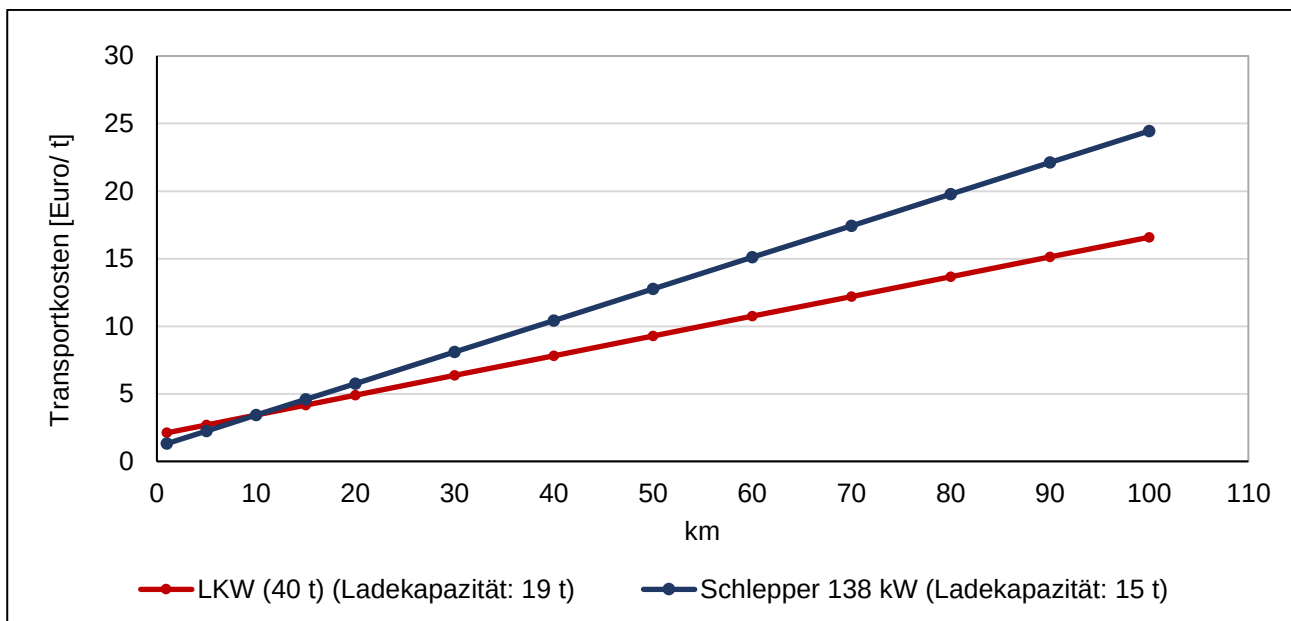


Abbildung 15 Transportkosten für Heu in Abhängigkeit von der Transportentfernung und der Transporttechnik

Eine allgemeine Aussage über die Maschinenkosten dieser beiden Techniken ist aber schwierig zu treffen, da die Auslastung dieser Techniken betriebsspezifisch ist und in der Praxis großen Schwankungen unterliegt. Bei kurzen Transportwegen ist der Transport mit einem Schlepper aufgrund der höheren Maschinenauslastung in der Regel kostengünstiger im Vergleich zum Transport mit einem LKW. Bei weiteren Transportwegen kann der Einsatz von einem LKW ökonomisch lohnenswert sein, da der Dieselverbrauch geringer und der Zeitbedarf kürzer ist im Vergleich zum Transport mit einem Schlepper.

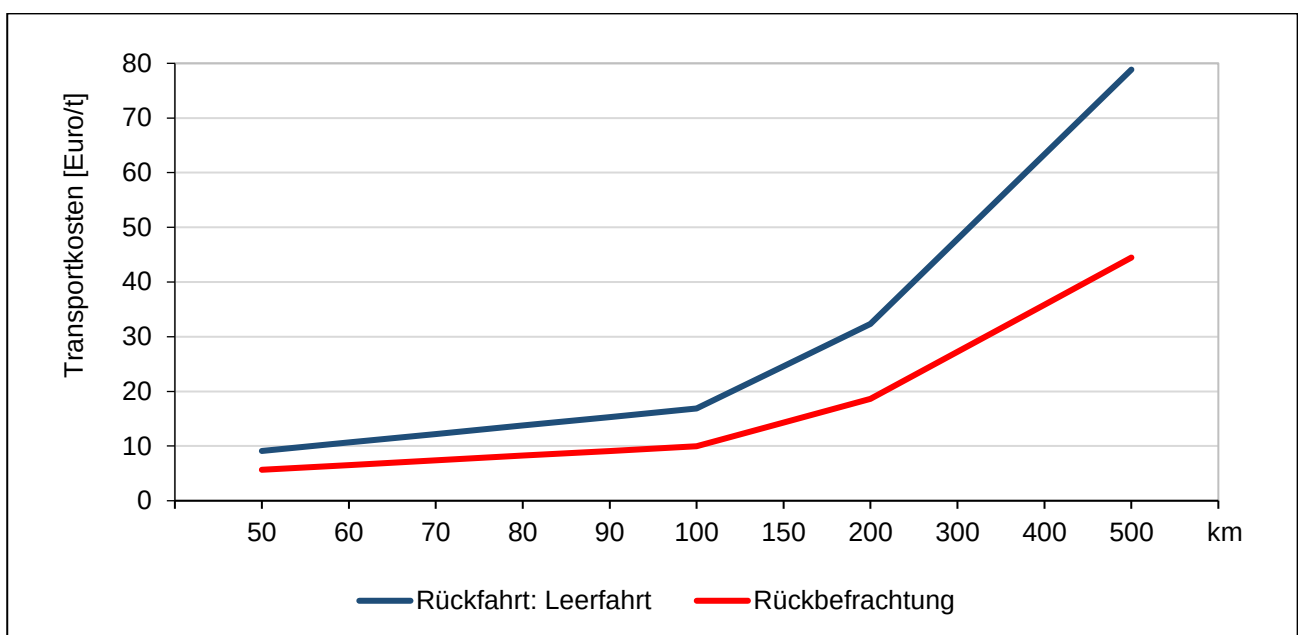


Abbildung 16 Transportkosten in Abhängigkeit ob auf dem Rückweg eine Leerfracht oder Rückbefrachtung erfolgt

In einer Region mit dezentralen Biomasseaufkommen kann es deswegen sinnvoll sein, ein zentral gelegenes Lager anzulegen. Die Landwirte können dort die halmgutartige Biomasse mit einem Schlepper hin transportieren und der Transport von diesem Zwischenlager zum Heizwerk erfolgt dann mit einem LKW. Dies ist aber nur eine Lösung bei längeren Transportwegen, da dadurch zwei Umschlagslinien anfallen und damit die Transportkosten insbesondere aufgrund der höheren Lohnkosten ansteigt (DBFZ, 2012).

Zudem können durch das Vermeiden von Leerfahrten mit Hilfe einer Rückbefrachtung die Kosten gesenkt werden (Abbildung 16). Das heißt, dass das Stroh bzw. Heu zum Lager des Heizwerkes geliefert wird und in der Umgebung des Heizwerkes der Lastwagen mit einer neuen Ware beladen wird. Deutlich wird eine Einsparung von Kosten durch das Vermeiden von Leerfahrten insbesondere bei Transportwegen von über 100 km.

Damit eine Rückbefrachtung erfolgen kann, müssen gute Transportnetzwerke bestehen. Die Rückbefrachtung von LKWs und die damit verbundene Vermeidung von Leerfahrten ist bereits Praxis, wird aber noch nicht ausreichend umgesetzt.

5.2.3.6 Lagerung

Die Lagerkosten werden maßgeblich von den kapitalgebundenen Kosten bestimmt. Diese werden durch den Lagerbedarf und -art beeinflusst. Der Lagerbedarf von Stroh- und Heuballen ist aufgrund des geringen Masse/Volumen-Verhältnisses und der damit verbundenen geringen Energiedichte um einen rund 17-fachen Volumenbedarf höher im Vergleich zu fossilen Energieträgern (FNR, 2014b). Dies wirkt sich auch auf den Flächenbedarf am Standort des Heizwerkes aus.

Bei Heizwerken bis zu 1 MW entspricht die Lagergröße in der Regel dem jährlichen Brennstoffbedarf. Bei größeren Heiz(kraft)werken entspricht der Lagerbedarf dem Brennstoffbedarf für eine festgelegte Periode. Das Lagervolumen sollte so gewählt werden, dass auch Feiertage mit dem dort lagerbaren Brennstoffvorrat überbrückt werden können. Bei der Lagerart wurde in diesem Vorhaben zwischen festen Lagergebäude (Festbaulager) und Leichtbau unterschieden. Hierbei handelt es sich um die Lagerarten, die bei den hier berücksichtigten Praxisbetrieben zum Einsatz gekommen sind. Bei Festbaulager kann zudem zwischen Neubau, sanierten Altbau und Altbau

unterschieden werden. Die höchsten Kosten fallen mit 9,20 Euro/m³ bei einem Neubau eines Festbaulagers aufgrund der hohen Investitionskosten (ca. 7,5 Euro/m³) an (Abbildung 17). Durch das Vorhandensein eines Altgebäudes am geplanten Standort des Heizwerks können die Kosten um ca. 90% und beim Vorhandensein eines Altgebäudes mit Sanierungsbedarf um ca. 70% im Vergleich zu einem neugebauten Festbaulager gesenkt werden. Wenn keine Altgebäude am Standort vorhanden sind, können die Lagerkosten durch die Wahl einer Leichtbaulagerhalle die Kosten um 70% im Vergleich zu einem neugebauten Festlager gesenkt werden.

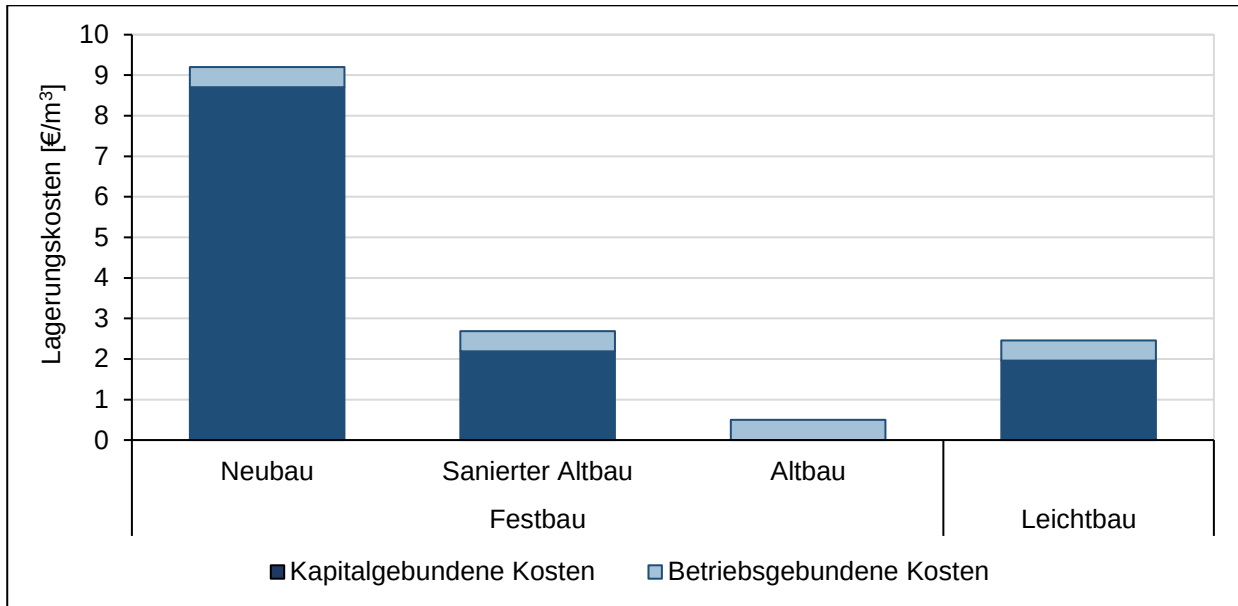


Abbildung 17 Kostenstruktur der Lagerung in Abhängigkeit von der Lagerart

Die Lagerung von Stroh und Heu kann außerdem in einer offenen Feldmiete oder einer Feldmiete mit Folienabdeckung erfolgen. Diese beiden Lagermöglichkeiten sind zwar deutlich kostengünstiger im Vergleich zu Fest- oder Leichtbauhallen, aber mit höheren Lagerverlusten (11% bzw. 8%) und einer Qualitätsminderung verbunden im Vergleich zur Lagerung in Fest- oder Leichtbauhallen (Lagerverluste: 2%) (DBFZ, 2012).

5.2.3.7 Nahwärmenetz

Die Kosten für ein Nahwärmenetz haben einen erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit eines Halmgutheizwerkes. Diese werden wiederum maßgeblich durch die Höhe der Wärmeabnahme und der Netzwerklänge beeinflusst (BMU, 2012).

Im Folgenden wird der Effekt von einem Neubau eines Nahwärmenetzes mit einer Länge von 800 m bzw. 1.200 m auf das Betriebsergebnis bei einem Wärmepreis von 55 Euro/MWh im Vergleich zur Einspeisung in ein vorhandenes Nahwärmenetz betrachtet. Ohne Nahwärmenetz liegt das Betriebsergebnis des Modellheizwerkes bei rund 32.000 Euro/a. Das Betriebsergebnis bleibt bei einem Neubau eines Nahwärmenetzes mit einer Länge von 800 m positiv, sinkt aber um 87% im Vergleich zum Betriebsergebnis eines Halmgutheizwerkes mit einer Wärmeeinspeisung in ein vorhandenes Wärmenetz. Bei einem Neubau des Nahwärmenetzes mit einer Länge von 1.200 m wird das Betriebsergebnis negativ. Das Halmgutheizwerk wäre damit nicht mehr rentabel.

Durch eine Förderung des Nahwärmenetzes in Höhe von 30% bezogen auf das Investitionsvolumen für das Nahwärmenetz könnte das Betriebsergebnis deutlich verbessert werden. Bei einer Netzwerklänge von 1.200 m müsste die Förderung aber mindestens 50% betragen, um die Kosten decken zu können. Dies verdeutlicht wie wichtig Marktanreizprogramme für den Bau von

Nahwärmenetzen im ländlichen Raum sind, um den Ausbau von Halmgutheizwerken zu befördern und damit das Stroh- und Heupotenzial in Deutschland energetisch nutzen zu können.

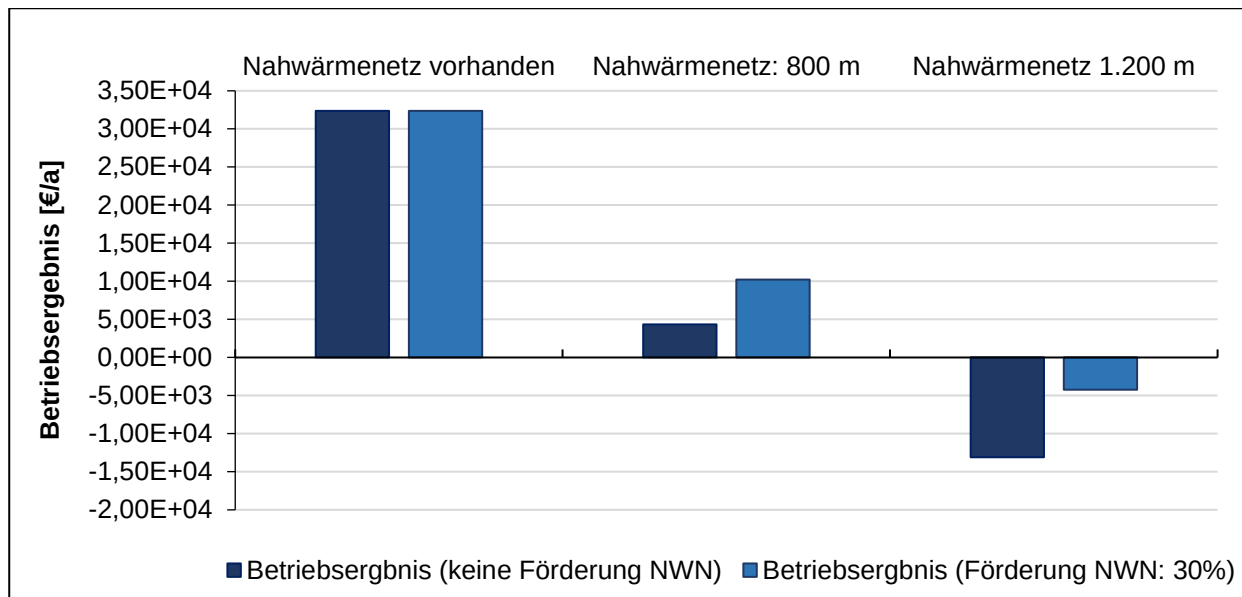


Abbildung 18 Einfluss der Kosten eines Nahwärmenetzes (NWN) auf das Betriebsergebnis eines Halmgutheizwerkes in Abhängigkeit von der Netzlänge (800 m, 1.200 m) und einer Förderung von 30% bezogen auf das Investitionsvolumen für das Nahwärmenetz.

Ohne Förderung lohnt sich der Neubau eines Nahwärmenetzes erst ab einer Wärmedichte von mindestens 1,5 MWh/a pro Meter Wärmenetz (FNR, 2014). Eine Förderung für ein Nahwärmenetz erhält man bereits ab einer Wärmedichte von mindestens 0,5 MWh/a pro Meter Wärmenetz. Im ländlichen Raum sind häufig noch keine Nahwärmenetze vorhanden (BMU, 2012). Dabei ist aufgrund der geringen Transportwege im ländlichen Raum gerade hier die energetische Nutzung von Halmgut von Interesse. Mit Hilfe einer Förderung von Nahwärmenetzen kann die Installation von Halmgutheizwerken im ländlichen Raum an Bedeutung gewinnen.

5.2.4 Aschenutzung und -entsorgung

Aus Gründen der Ressourcen- und Deponieraumschonung ist die stoffliche Nutzung von den Halmgutaschen der Entsorgung vorzuziehen. Zudem besteht durch die Nutzung von Halmgutaschen ein Kosteneinsparungspotenzial für die Heizwerke. Die Entsorgung der Asche von Halmgutheiz(kraft)werken ist bei einer hohen Auslastung und damit einem hohen Biomassebedarf mit hohen Kosten (60 Euro/t) verbunden, da der Aschegehalt von Halmgut mit 4 bis 6% bezogen auf die Trockenmasse hoch ist. Die Nutzungsmöglichkeiten für Halmgutasche reichen von der Nutzung als Dünger (Nährstoffrückführung), als Zuschlagsstoff für Beton und Zement bis hin zum Einsatz als Asphaltmischstoff (Naumann, 2019). Der Schwerpunkt wird in dieser Arbeit auf die Rückführung der Asche und der darin enthaltenen Nährstoffe auf Agrarflächen gelegt. So können die Nährstoffentzüge in Folge der Stroh- und Heuentnahme für Nährstoffe teilweise kompensiert werden (Kreislaufwirtschaft). Derzeit fallen Bundesweit jährlich aufgrund der geringen Anzahl an Halmgutheiz(kraft)werken lediglich ca. 5.000 t Asche in Halmgutheiz(kraft)werken an (Bischoff et al., 2019). Aus diesem Grund ist derzeit auch nur eine dezentrale Nutzung der Halmgutasche mit einem geringen oder keinen Aufbereitungsbedarf machbar. Dabei steht der Umweltschutz vor der Ressourceneffizienz und deswegen müssen bei Nutzung der Halmgutaschen die Regularien der Gesetzgebung eingehalten werden. Die für die Nutzung von Halmgutasche als Düngemittel relevanten Regelwerke aus dem nationalen Recht sind in der Tabelle 18 nach Schiemenz (2012) aufgeführt. Während der Verbrennung gehen N und C verloren. Halmgutasche enthält aber

relevante Konzentrationen an P und K, die zum Teil die Mindestgehalte nach DüMV einhalten. Für Strohasche liegen die P_2O_5 -Konzentrationen zwischen ca. 1%/TM und 16%/TM und die K_2O -Konzentrationen zwischen 1,7%/TM und 15%/TM (Bischoff, 2019; Biertümpfel, 2010; Van Loo und Koppejan, 2008).

Tabelle 18: Regelwerke für die flächenhafte Verwertung von mineralischen Abfällen/ Biomasseaschen in und auf Böden (Schiemenz, 2012)

Rechtsbereich	Gesetz/ Verordnung	Paragraph	Titel bzw. Regelungsinhalt
Abfallrecht	KrW/AbfG	§ 3	Begriffsbestimmungen
		§ 4	Grundsätze der Kreislaufwirtschaft
		§ 5	Grundpflichten der Kreislaufwirtschaft im Bereich der landwirtschaftlichen Düngung
		§ 8	Anforderungen an die Kreislaufwirtschaft im Bereich der landwirtschaftlichen Düngung
		§ 10	Grundsätze der gemeinwohlverträglichen Abfallbeseitigung
		§ 11	Grundpflichten der Abfallbeseitigung
	BioAbfV	§ 4	Anforderungen hinsichtlich der Schadstoffe und weiterer Parameter
		§ 5	Anforderungen an Gemische
		§ 9	Bodenuntersuchungen
	AVV	Anlage zu § 2	Abfallschlüssel 10 (Abfälle aus thermischen Prozessen)
Düngemittelrecht	DünG	§ 2	Begriffsbestimmungen
		§ 3	Anwendungen
	DüMV	§ 3	Zulassung von Düngemitteltypen
		Anlage 1	Definition von Düngemitteltypen
		Anlage 2	Tabellen zu Anlage 1
	DüV	§ 3	Grundsätze für die Anwendung von Düngemitteln
		§ 8	Anwendungsbeschränkungen
Bodenschutzrecht	BBodSchG	§ 3	Anwendungsbereich
		§ 6	Auf- und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden
		§ 7	Vorsorgepflicht
	BBodSchV	§ 10	Vorsorgeanforderung
		§ 11	Zulässige Zusatzbelastung
		§ 12	Anforderungen an das Aufbringen und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden
Naturschutzrecht	BNatSchG	§ 18	Eingriffe in Natur und Landschaft
Wasserrecht	WHG	§ 48	Reinhaltung des Grundwassers

Bei Landschaftspflegeheu liegt der P_2O_5 zwischen 4%/TM und 5,4%/TM und K_2O -Konzentrationen zwischen 3,3%/TM und 9,9%/TM (Bischoff, 2019; Dahms, 2017). Die Halmgutaschen lassen sich damit nach DüMV unterschiedlichen Düngemitteltypen zu ordnen (Tabelle 19).

Dabei ist zu beachten, dass Halmgutaschen nur mineralische Bestandteile enthalten. Aus diesem Grund muss den Aschen Organik zugeführt werden, um als organisch-mineralischer Dünger eingeordnet werden zu können. Das Biomasseheizkraftwerk Emlichheim hat dies durch die Beimischung von Stroh erreicht. In Gefäßversuchen konnte bereits eine P- und K- Düngewirkung von Brennraumasche, Brennraum-Zyklonasche-Mischungen sowie Brennraumasche-Stroh-Mischung nachgewiesen werden, die bei 70-100% im Vergleich zu mineralischen Düngern liegen (Bischoff, 2019; Koal, 2019). Neben den Nährstoffkonzentrationen wird die Eignung von den Halmgutaschen als Düngemittel durch deren Konzentration an Schadstoffen bestimmt. Man unterscheidet bei der anfallenden Asche in Halmgutheizwerken zwischen der Brennraumasche mit einem Anteil von 80-90 Gew.-%, der Zyklonflugasche mit einem Anteil von 2-5 Gew.-% und der Gewebefilterasche mit einem Anteil von 5-15 Gew.-% (Obernhauser, 1997). In diesen Aschefractionen nimmt die Schwermetallkonzentration in folgender Reihenfolge zu: Brennraumasche < Zyklonflugasche < Gewebefilterasche. Für den Einsatz als Düngemittel sind deswegen nur die Brennraumasche und Zyklonasche geeignet, während die Gewebefilterasche aufgrund der hohen Schadstoffgehalte nicht als Düngemittel zugelassen ist. In den Halmgutheizwerken wird die Gewebefilterasche generell getrennt ausgebracht und gelagert. Die Zyklonasche wird getrennt oder zusammen mit der Brennraumasche ausgetragen und gesammelt. Die Zyklonasche kann ebenfalls relevante Mengen an Schwermetallen enthalten und damit die Düngemittelqualität der Brennraumasche drastisch reduzieren. Aus diesem Grund sollte man die Brennraumasche und Zyklonasche getrennt voneinander austragen und lagern. Bei zwei der hier untersuchten Heizwerke (Praxisbetriebe) wurde die Asche den Strohlieferanten als Dünger kostenfrei mitgegeben. Diese haben die Asche dann auf dem Feld als Dünger ausgebracht. Dadurch können zum einen die Kosten des Nährstoffentzugs durch die Strohentnahme für K und P zumindest teilweise kompensiert werden. Zum anderen können die Ascheentsorgungskosten um 80-90% reduziert werden.

Tabelle 19: Definition der Düngemitteltypen nach DüMV (2012) und Möglichkeit der Zuordnung der Halmgutaschen zu den Düngemitteltypen (Schlegel, 2019)

Typenbezeichnung	Mindestgehalt	Zuordnung der Halmgutaschen
<u>Kaliumdünger</u> (Aufbereitung von Aschen)	10% wsl. K_2O	sehr eingeschränkt möglich (starke Schwankungen in den K_2O -Konzentrationen)
<u>mineral. PK-Dünger</u>	5% P_2O_5 5% K_2O	i.d.R. nur für Heuaschen möglich
<u>org. mineral. PK-Dünger</u> (mit mind. 10% organ. Substanz)	0,5% P_2O_5 1% K_2O	möglich
<u>org. mineral. P-Dünger</u> (mit mind. 10% organ. Substanz)	3% P_2O_5	möglich (bei Strohaschen eingeschränkt)
<u>org. mineral. K-Dünger</u> (mit mind. 10% organ. Substanz)	3% K_2O	möglich (bei Strohaschen leicht eingeschränkt)

5.2.5 Finanzierung und Fördermöglichkeiten

Die Investitionskosten sind wie beschrieben von Halmgutheiz(kraft)werken sehr hoch. Aus diesem Grund spielt die Planung der Finanzierung und die sorgfältige Recherche nach Fördermöglichkeiten eine entscheidende Rolle für die Realisierung geplanter Halmgutheiz(kraft)werke. Die Finanzierung von Halmgutheiz(kraft)werken und gegebenenfalls auch vom Nahwärmenetz erfolgen über Eigenmittel und Bankkredite. Ein potentieller Investor von einem Halmgutheiz(kraft)werk muss dem Kreditgeber ausreichende eigene Sicherheiten vorweisen können und ihn von der Kreditwürdigkeit des Konzeptes überzeugen. Neben einer erprobten Technik und einem Standort mit einem hohen Brennstoffpotential und einer hohen Wärmeabnehmerdichte spielen auch Aspekte der Umweltverträglichkeit eine wichtige Rolle (FNR, 2014b). Können die Investitionen nicht vom Initiator des geplanten Halmgutheizwerkes gewährleistet werden, ist die Contracting-Lösung eine Möglichkeit. Das bedeutet ein Contractor übernimmt die Investitionen (und ggf. auch weitere Aufgaben) und der Contractornehmer zahlt für die erbrachte Energiedienstleistung (Wärme und ggf. Strom) (FNR, 2014a).

In Deutschland gibt es unterschiedlich Förderprogramme, die für Halmgutheiz(kraft)werke in Frage kommen. Ein zentrales Förderinstrument von Anlagen zur Produktion von Wärme auf Basis von Erneuerbaren Energien auf Bundesebene ist das Marktanreizprogramm (MAP) „Programm Erneuerbare Energien Premium“. Dieses MAP wird von der KfW und dem BMWi ausgeführt und gewährt Kredit und Tilgungszuschüsse für Biomasseanlagen zur Verbrennung fester Biomasse für die thermische Nutzung und Kraft-Wärme-Kopplungs-Biomasseanlage (KfW, 2019 a). Gefördert werden die Errichtung und Erweiterung automatisch beschickter Anlagen zur Verfeuerung fester Biomasse mit einer installierten Nennwärmeleistung von über 0,1 MW (bis 2 MW KWK-Anlagen). Außerdem werden die Errichtung und die Erweiterung eines Wärmenetzes inklusive der Errichtung der Hausübergabestationen gefördert, sofern mindestens 50% der Wärme aus erneuerbaren Energien stammt und das Wärmenetz überwiegenden zur Versorgung von Neubauten (60%) gebaut wird. Zudem sollte das Nahwärmenetz im Mittel mindestens eine Wärmedichte von 0,5 MWh/a pro Meter Wärmenetz haben (KfW, 2019 a).

Folgend sind die Konditionen des MAP kurz zusammengefasst (KfW, 2019b):

- ab 1,00% effektiver Jahreszins
- für alle, die Wärme aus erneuerbaren Energien nutzen wollen
- Kredit bis zu 25 Mio. Euro pro Vorhaben mit attraktivem Tilgungszuschuss
- 20% höherer Tilgungszuschuss für den Austausch besonders ineffizienter Heizungsanlagen
- Weitere Informationen finden sich im Merkblatt zu diesem Anreizprogramm (KfW, 2019).

Seit Juli 2017 fördert das BMWi mit dem „Modellvorhaben Wärmenetzsysteme 4.0“ Hochinnovative Niedertemperaturwärmenetze der vierten Generation. Diese Wärmenetze sollten einen hohen Anteil an erneuerbaren Energien, eine effiziente Nutzung von Abwärme und ein deutlich niedrigeres Temperaturniveau im Vergleich zu klassischen Wärmenetzen haben. Weitere Informationen finden sich unter BAFA (2018).

Einen Überblick über die Förderprogramme im Bereich Energieeffizienz und Umweltschutz für die einzelnen Bundesländer finden sie unter dem Link: <https://www.pius-info.de/service/foerderung-und-beratung/foerderprogramme-laender/>. Zudem kann man über die einzelnen Bundes- und Landesministerien und den Energieagenturen der Länder Informationen zu den Fördermöglichkeiten erhalten. Einen genaueren Überblick über die Fördermöglichkeiten in Deutschland und der einzelnen Länder erhält man über die Förderdatenbank des BMWi.

5.3 Wettbewerbsfähigkeit von einem Halmgutheizkraftwerk

Die Kostenstruktur von einem Halmgutheizkraftwerk wird ähnlich wie beim Halmgutheizwerk maßgeblich von verbrauchs- und den kapitalgebundenen Kosten bestimmt, während die Strom- bzw. Wärmegestehungskosten von einem Gasheizwerk maßgeblich von den Brennstoffpreis beeinflusst werden. Die Wettbewerbsfähigkeit von einem Halmgutheizkraftwerk wird dabei von den gleichen Einflussfaktoren, wie von einem Halmgutheizwerk bestimmt. Aus diesem Grund wird hier auf die Einflussfaktoren nicht eingegangen, sondern auf Abschnitt 5.2 verwiesen. Die Technologie eines Halmgutheizkraftwerkes ist aufwendiger im Vergleich zu einem Halmgutheizwerk und damit mit höheren Investitionskosten verbunden. Aus diesem Grund hat die Auslastung auch einen größeren Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit eines Halmgutheizkraftwerkes im Vergleich zu einem Halmgutheizwerk. Um eine hohe Auslastung zu erreichen ist eine wärmegeführten Betriebsweise zu empfehlen. In wärmegeführten Heizkraftwerken werden 30% Strom und 60% Wärme bereitgestellt. In der Abbildung 19 sind die Energiegestehungskosten eines Halmgutheizkraftwerkes dem Strom- und Wärmepreis für Haushalte und Industrie gegenübergestellt.

Die Energiegestehungskosten eines Halmgutheizkraftwerkes liegen deutlich über dem Wärmepreis, aber unter dem Strompreis (Abbildung 19). Damit ist die Wettbewerbsfähigkeit von einem Halmgutheizkraftwerk mit einem Gasheizwerk erst bei einer hohen Auslastung von über 50% und nur unter optimalen Bedingungen (z.B. hoher Energiepreis, hohes Brennstoffpotenzial in der Region, Vorhandensein von Infrastruktur) möglich. Deswegen sollte am Standort des Halmgutheizkraftwerkes Energieabnehmer mit einem hohen ganzjährigen Wärmebedarf vorhanden sein, um eine hohe Auslastung zu gewährleisten.

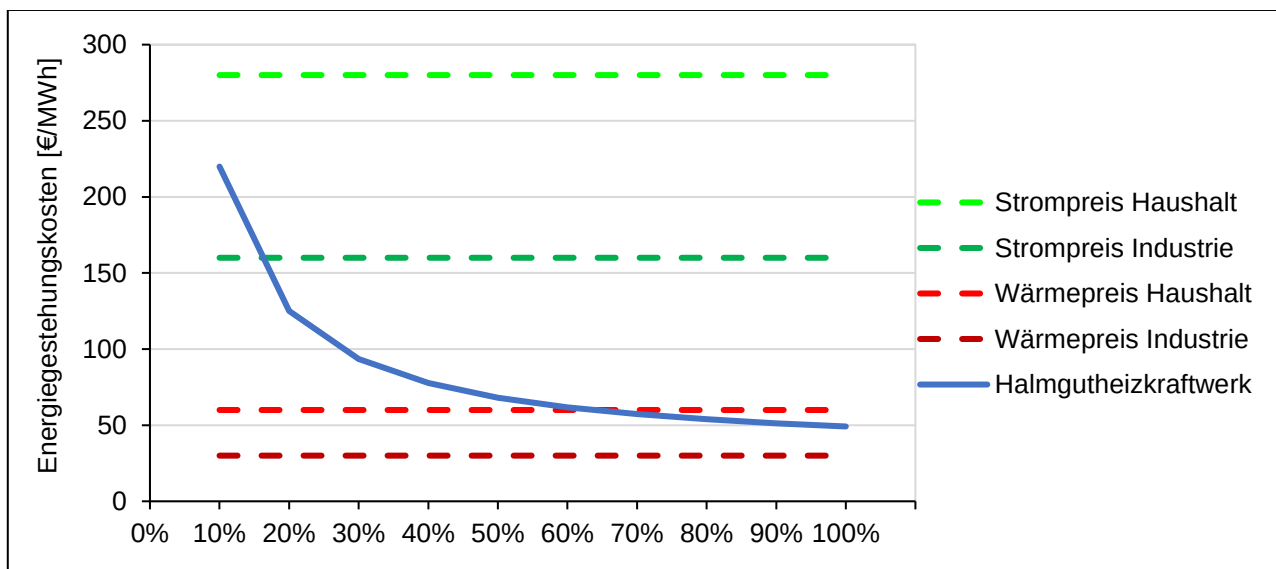


Abbildung 19 Energiegestehungskosten von einem Halmgutheizkraftwerk (eigene Berechnungen) im Vergleich zum Strom- und Wärmepreis für Haushalte und Industrie (BMW, 2019)

Eine hohe Auslastung vom Halmgutheizkraftwerk ist wiederum mit einem hohen Brennstoffbedarf verbunden und ist folglich mit längeren Transportwegen und einem höheren Lageraumbedarf verbunden. Dies wirkt sich steigernd auf die Kosten aus (vgl. dazu auch Abschnitt 5.2.3.5 und 5.2.3.6). Deswegen sollte vorab Verträge mit Biomasselieferanten geschlossen werden, in dem die zu liefernde Brennstoffmenge und der Brennstoffpreis geklärt werden. Das gleiche gilt für die Energieabnahme und den dafür zu zahlenden Preis. Dabei muss der Preis für die zu liefernde Energie so hoch sein, dass die Energiegestehungskosten gedeckt werden können. Zudem wirkt sich

das Vorhandensein von Infrastruktur wie Nah- bzw. Fernwärmenetz und die Anbindung an das Verkehrsnetz auf den wirtschaftlichen Betrieb einer Anlage aus (vgl. dazu auch Abschnitt 5.2.3.7).

Die Wettbewerbsfähigkeit von Halmgutheizkraftwerken wird zudem durch Fördermöglichkeiten beeinflusst. Für die Stromerzeugung ist das 2017 novellierte Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) das zentrale Förderinstrument. Die Höhe der Vergütung für Strom aus erneuerbaren Energien wird seit Januar 2017 durch Ausschreibungen ermittelt und nicht wie bisher staatlich festgelegt. Dabei hat der Anlagenbetreiber einer auf Erneuerbaren Energien basierenden Anlage die beste Chance den Zuschlag zu erhalten, der für die Produktion des Stroms eine möglichst geringe Förderung benötigt. Schon die Minderung der Förderung in Folge der Novellierung des EEGs 2014 hat zu einem deutlich geringeren Ausbau von Biomasseheizkraftwerken geführt (Hofstede et al., 2018). Es ist damit zu rechnen, dass sich dieser Trend mit der Novellierung des EEGs 2017 fortsetzt.

Zudem kann der von Biomasseheizkraftwerken produzierte Strom durch das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) über einen Zeitraum von zehn Jahren zu bestimmten Sätzen vergütet werden. Die derzeit gültige Fassung trat 2016 in Kraft.

6 Treibhausgasbilanz

6.1 Treibhausgasminderungspotential

Die THG-Bilanz wurde zur Bewertung der Nachhaltigkeit einer Nutzung von Stroh und Heu in Heiz(kraft)werken durchgeführt. Dabei wurden alle THG-Emissionen berücksichtigt, die durch den Einsatz der benötigten Betriebsstoffe (Diesel, Dünger, Strom) entstehen. In der THG-Bilanz wurde die gesamte Wertschöpfungskette von der Brennstoffbereitstellung bis zur energetischen Umwandlung betrachtet. Die THG-Bilanz bezieht sich nur auf das einzelne Jahr der Strohbergung bzw. der Heuernte und nicht auf die gesamte Fruchtfolge.

Die energetische Stroh- und Heunutzung in Heiz(kraft)werken hat nach diesen Berechnungen THG-Emissionen in Höhe von 10 g CO₂ Äqui./MJ bis 48 g CO₂ Äqui./MJ, die Wärmebereitstellung in einem Gasheizwerk ist mit THG-Emissionen in Höhe von 80 g CO₂ Äqui./MJ verbunden (Biograce II, 2012). Die THG-Emissionen von einem Halmgutheiz(kraft)werk sind um 42 - 87% geringer im Vergleich zu einem Gasheizwerk. Die Strombereitstellung mit fossilen Energieträgern hat THG-Emissionen in Höhe von 180 g CO₂-Äqui/MJ (Biograce II, 2012). Diese sind höher als bei einem auf Biomasse basierten Kraftwerk.

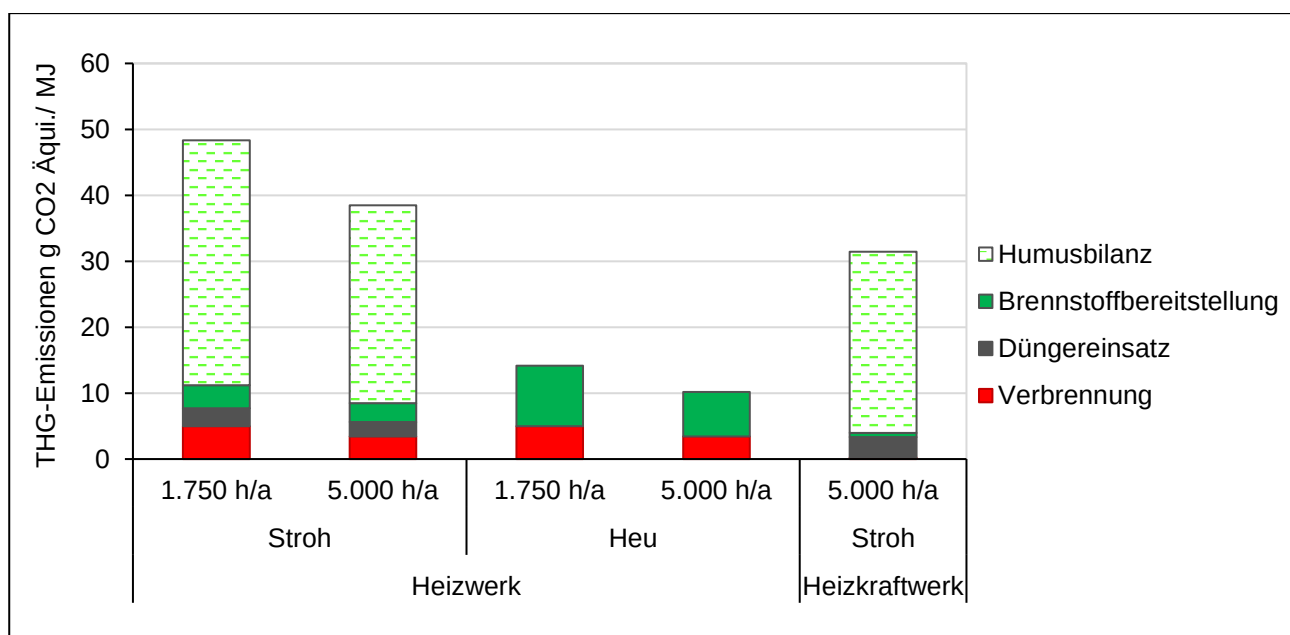


Abbildung 20 Treibhausgasemissionen bei der Nutzung von Stroh und Heu als Brennstoff in Heiz(kraft)werken

Die THG-Emissionen der Brennstoffbereitstellung (Stroh, Heu) haben dabei einen höheren Einfluss auf die THG-Bilanz von Halmgutheizwerken als die THG-Emissionen während der Verbrennung (Konversion).

Bei der Bereitstellung von Stroh und Heu wurden folgende THG-Emissionen berücksichtigt:

- THG-Emissionen durch Dieserverbrauch während der Brennstoffbereitstellung,
- THG Emissionen durch die entgangene C-Sequestrierung im Boden in Folge der Biomasseentnahme entstanden sind
- THG-Emissionen der Düngemittelproduktion, in Höhe einer Ersatzdüngung durch den Nährstoffentzug der Strohentnahme

Bei der Konversion wird zwischen den Emissionen für den Strombedarf der Anlage und den direkten Emissionen an N_2O und CH_4 unterschieden. Letzteres fällt so gering aus ($0,23 \text{ g CO}_2 \text{ Äqui./MJ}$), dass sie in der Abbildung 20 nicht darstellbar waren.

Die mit der **Bereitstellung** von Stroh ($\emptyset 3 \text{ g CO}_2 \text{ Äqui./MJ}$) verbundenen THG-Emissionen infolge des **Dieselvebrauchs** sind im Vergleich zur Heubereitstellung ($\emptyset 8 \text{ g CO}_2 \text{ Äqui./MJ}$) um ca. 63% geringer, da beim Stroh die THG-Emissionen von der Mahd dem Korn als Hauptprodukt angerechnet wurden und keine Trocknung auf dem Feld stattfand. Bei der Heuernte sind dagegen der Dieselvebrauch für Mahd, Wenden und Schwaden, Pressen, Umschlag und Transport zu berücksichtigen.

Demgegenüber werden die THG-Emissionen für eine Düngung nur bei der Strohbereitstellung ($\emptyset 3 \text{ g CO}_2 \text{ Äqui./MJ}$) berücksichtigt. Diese entsprechen den THG-Emissionen für eine Ersatzdüngung in Höhe des Nährstoffentzugs durch die Strohentnahme. Auf den extensiven Grünlandflächen wird dagegen davon ausgegangen, dass keine Düngung durchgeführt wird und damit keine THG-Emissionen anfallen. Denn durch einen Verzicht von Düngung kann die Artenvielfalt auf Grünland gesteigert werden, da die Vegetationstypenvielfalt von Grünland mit der Intensität der Düngung abnimmt (Niedrist et al., 2009). Unter Berücksichtigung des **Düngereinsatzes** steigen die THG-Emissionen der Strohbereitstellung. Diese sind aber dennoch um ca. 30% niedriger im Vergleich zur Heubereitstellung.

Zudem wird häufig die Notwendigkeit einer Berücksichtigung der entgangenen C-Speicherung im Boden, **Humusbilanz**, diskutiert. Humus in Böden gilt als der größte terrestrische Speicher für organischen Kohlenstoff, der im Vergleich zur oberirdischen Vegetation doppelt so hoch ist (Ciais et al., 2013). Eine langfristige und stabile Humuseinlagerung trägt zum Klimaschutz bei.

Im Boden befindet sich ca. 65% des gesamten organischen C im Oberboden (0 - 30 cm) und 35% im Unterboden (30 - 100 cm) (Flessa et al., 2018). Kohlenstoffeinträge in den Unterboden durch tief wurzelnde Pflanzen oder die Bodenfauna haben eine besondere Bedeutung für die langfristige C-Speicherung, da dort der organische C im Mittel sehr viel langsamer umgesetzt wird als im Oberboden (Flessa et al., 2018).

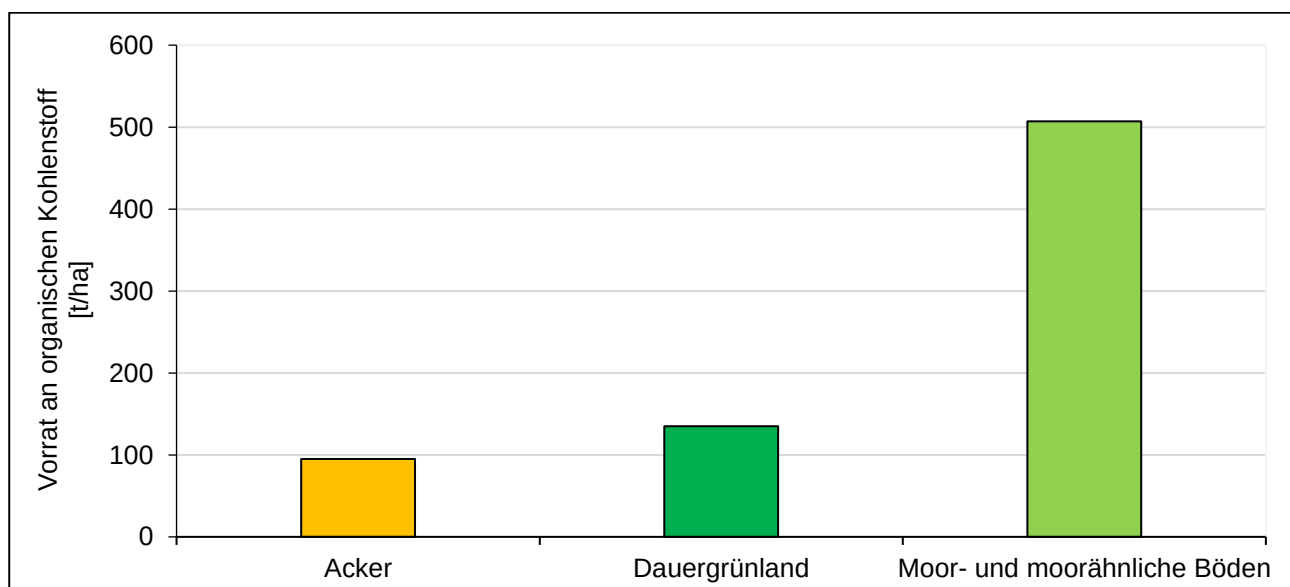


Abbildung 21 Vorräte an organischem Kohlenstoff im Boden (0 – 100 cm) von Mineralböden mit Ackernutzung, Dauergrünland, sowie in landwirtschaftlich genutzten Moor- und moorähnlichen kohlenstoffreichen Böden (verändert nach: Flessa et al., 2018)

In mineralischen Böden Deutschlands ist unter Grünland aufgrund des ganzjährigen Bewuchses, der intensiven Durchwurzelung sowie dem höheren Einsatz von organischen Düngern der Anteil an organischen C im Oberboden um 31% höher als unter Ackernutzung (Poeplau et al., 2011). Landnutzungsänderungen, wie die Umwandlung von Acker- in Grünland, wirken sich über Jahrzehnte auf die Humusvorräte im Boden aus (Poeplau et al., 2011). Nach Flessa et al. (2018) sinkt der Humusgehalt im Boden je länger der Wechsel von Grünland zu Acker zurückliegt. Andersherum verhält es sich beim Wechsel von Acker- zu Grünland.

Eine Besonderheit stellen Moorböden oder moorähnliche Böden dar, die bis zu 5-mal so viel an C im Vergleich zu Mineralböden speichern können und ca. 7% der landwirtschaftlichen Fläche einnehmen (Flessa et al., 2018). Die landwirtschaftliche Nutzung von entwässerten Mooren ist für 37% der THG-Emissionen in der Landwirtschaft verantwortlich. Der Humusgehalt im Oberboden wird dabei maßgeblich von der Landnutzung beeinflusst. Durch eine Wiedervernässung könnten bis zu 27% dieser THG-Emissionen vermieden werden.

Die energetische Nutzung von Grünlandbiomasse, insbesondere von wiedervernässten Mooren, kann zum Erhalt von Grünlandflächen bzw. zur Wiedervernässung von Mooren beitragen, da deren Wertschöpfung gesteigert wird. Darüber hinaus kommt es an diesen Standorten zu einer langfristigen Sequestrierung von organischen C im Boden (Abbildung 21). Diese Klimaschutzleistung müsste der energetischen Nutzung von Heu (bzw. Paludibiomasse) noch zusätzlich zugeschrieben werden.

Demgegenüber kann die energetische Nutzung von Stroh eine humuszerrende Wirkung haben, die sich negativ auf die Klimaschutzleistung und die Produktivität einer Ackerfläche auswirkt. So wird auf Flächen mit Ackernutzung durch eine Strohdüngung 10 - 20% des enthaltenden C längerfristig als Humus im Boden stabilisiert. Diese wird dem Boden bei Strohentnahme vorenthalten und fehlt dementsprechend für die Humusreproduktion. Durch organische Dünger wie Mist, Gülle, Gärreste und Kompost könnte dieser Humusverlust kompensiert werden. Die verstärkte Ausbringung von organischen Düngern birgt aber die Gefahr von Nährstoffüberschüssen. Daneben kann der Anbau von Zwischenfrüchten die Vorräte an organischem C in Ackerböden langfristig steigern (Poeplau und Don, 2015). Die Humusersatzmaßnahmen sind mit Kosten verbunden, die den Strohpreis stark erhöhen und damit die Strohnutzung unrentabel gestalten können. In den Untersuchungen von der DBFZ (2012) wurden für einen Betrieb mit 100 Milchkühen, 235 ha Ackerfläche und 15 ha Grünland Humusersatzkosten in Höhe von 15,50 bis 40 Euro/ha in Abhängigkeit von der Humusersatzmaßnahme berechnet.

Voraussetzung für die energetische Nutzung von Stroh ist damit eine ausgeglichene Humusbilanz. Geeignete Standorte für die Strohentnahme sind Regionen mit einem hohen Getreidefruchtanteil, da hier ein Gleichgewicht von Ab- und Aufbau von organischen Bodensubstanz auch bei Strohentnahme gewährleistet werden kann. In solchen Regionen könnte eine Strohdüngung sogar negative Effekte auf die Folgefrucht und Bodeneigenschaften haben (Köller et al., 2007):

- Probleme bei der Bodenbearbeitung und Saatbettbereitung
- Behinderung der Wasserversorgung des Keimlings
- Stickstoffimmobilisierung
- Steigerung des Krankheitsdrucks und Schädlingsbefalls
- Strohabbauprodukte als Wachstumshemmer

Es kommt also auf den Standort an, ob bei einer Strohnutzung ein Humusabbau stattfindet und die entgangene C-Speicherung in der THG-Bilanz berücksichtigt werden muss.

Die entgangene CO₂-Speicherung im Boden durch die Strohentnahme liegt bei durchschnittlich 34g CO₂ Äqui./MJ. Dementsprechend sind bei Berücksichtigung der **Humusbilanz** die THG-Emissionen der Strohbereitstellung (Ø 40g CO₂ Äqui./MJ) um etwa das 3-fache höher im Vergleich zur Heubereitstellung (Ø 8g CO₂ Äqui./MJ). Ohne Berücksichtigung der Humusbilanz sind die durchschnittlichen THG-Emissionen der Strohbereitstellung mit 6g CO₂ Äqui./MJ dagegen geringer im Vergleich zur Heubereitstellung (Abbildung 20).

Neben den THG-Emissionen für die Bereitstellung von Stroh und Heu müssen auch die THG-Emissionen während der **Konversion** in der THG-Bilanz berücksichtigt werden. Bei der Konversion hat der Strombedarf für den Anlagenbetrieb der Heizwerke den höchsten Effekt auf die THG-Bilanz, während die N_2O - und CH_4 -Emissionen bei der Verbrennung eine untergeordnete Rolle spielen. In Halmgutheizwerken wurde davon ausgegangen, dass der Strombedarf über fossile Energieträger entdeckt wird. Beim Halmgutheizkraftwerk wurde dagegen unterstellt, dass für den Anlagenbetrieb Strom aus eigener Produktion eingesetzt wird. Damit sind die THG-Emissionen während der Konversion deutlich geringer im Vergleich zu Heizwerken. So lagen die THG-Emissionen während der Konversion von einem Halmgutheizwerk bei durchschnittlich 4g CO_2 -Äqui./MJ und bei einem Heizkraftwerk bei < 0,3g CO_2 -Äqui./MJ.

Insgesamt liegen die THG-Emissionen von dem Strohmodellheizwerk bei durchschnittlich 10 g CO_2 -Äqui./MJ ohne Humusbilanz bzw. 44g CO_2 -Äqui./MJ unter Berücksichtigung der Humusbilanz. Beim heubasierten Modellheizwerk entstehen Emissionen in Höhe von durchschnittlich 12g CO_2 -Äqui./MJ. Damit werden durch ein Halmgutheizwerk unabhängig von der Humusbilanz THG-Emissionen im Vergleich zu einem Gasheizwerk (80 g CO_2 Äqui./MJ) vermieden.

6.2 Effekt einer Honorierung der Klimaschutzleistung auf die Wettbewerbsfähigkeit von Halmgutheizwerken

In der Abbildung 22 sind die Wärmegestehungskosten in Abhängigkeit von der Honorierung der Klimaschutzleistung dargestellt. Derzeit beträgt der Zertifikatspreis 20 Euro/t CO_2 -Äqui., langfristig ist mit Zertifikatspreisen in Höhe von 80 Euro/t CO_2 -Äqui. zu rechnen (OECD, 2018). Eine Honorierung der Klimaschutzleistung in Höhe von 20 Euro/t CO_2 -Äqui. würde die Wettbewerbsfähigkeit von Halmgutheizwerken mit einer Auslastung von 1.750 h/a im Vergleich zu Gasheizwerken verbessern, diese wäre aber dennoch geringer im Vergleich zu Gasheizwerken (Gaspreis für Haushalt: ca. 60 Euro/MWh, Gaspreis für Industrie: ca. 30 Euro/MWh).

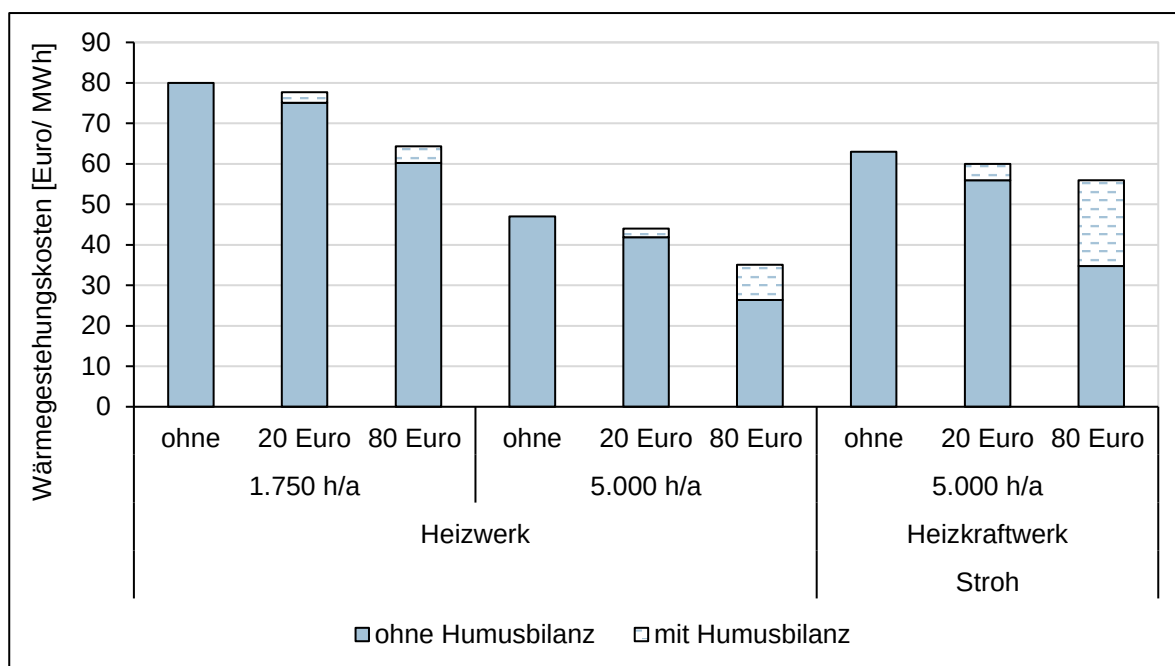


Abbildung 22 Wärmegestehungskosten von Halmgutheiz(kraft)werken in Abhängigkeit von der Honorierung der Klimaschutzleistung (20 bzw. 80 Euro/t CO_2 -Äqui.) und der entgangenen C-Speicherung durch Strohentnahme (Humusbilanz)

Betrachtet man die Halmgutheizwerke mit einer Auslastung von 5.000 h/a würde eine Honorierung der Klimaschutzleistung in Höhe von 20 Euro/t CO₂-Äqui. die Energiegestehungskosten um ca.11% gesenkt werden. Bei einer Honorierung der Klimaschutzleistung in Höhe von 80 Euro/t CO₂-Äqui. würden die Wärme gestehungskosten von Halmgutheiz(kraft)werken um 45% reduziert werden. Die Berücksichtigung der Humusbilanz und die damit verbundene Reduktion der Klimaschutzleistung wirken sich auch auf die Wärme gestehungskosten aus. So würde die Honorierung der Klimaschutzleistung um 33% verringert werden. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Strohentnahme nur unter Berücksichtigung einer ausgeglichenen Humusbilanz erfolgen sollte.

Generell würde eine Honorierung der Klimaschutzleistung von Halmgutheiz(kraft)werken zur Steigerung von deren Wettbewerbsfähigkeit mit Gasheiz(kraft)werken beitragen.

7 Fazit

7.1 Empfehlungen zur Nutzung von Stroh und Heu in Heiz(kraft)werken aus Sicht der Wirtschaftlichkeit und des Klimaschutzes

Die Nutzung von Stroh und Heu in Heiz(kraft)werken kann die Wertschöpfung im ländlichen Raum steigern und zum Klimaschutz beitragen. Die Verwertung des hohen Strohpotenzials in Deutschland könnte die Wertschöpfung des Getreideanbaus steigern. Zudem trägt die energetische Verwertung von Heu zur Wertschöpfung von Grünland bei, da für Grünlandbiomasse oft Nutzungsmöglichkeiten fehlen und ein Umbruch in Ackerland nicht erlaubt ist.

In diesem Vorhaben konnte anhand der Auswertung von den Wirtschaftlichkeitsdaten der Praxisheizwerke und anhand der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auf Grundlage der Modellheiz(kraft)werke gezeigt werden, dass Halmgutheiz(kraft)werke mit Gasheizwerken wettbewerbsfähig sein können. Die energetische Nutzung von Heu und Stroh ist aber technisch aufwendig und mit hohen Investitions- und Instandhaltungskosten verbunden. Aus diesem Grund müssen Halmgutheizwerke (> 50%) und Halmgutheizkraftwerke (> 60%) eine hohe Auslastung aufweisen. Dabei müssen auch langfristige Entwicklungen wie z.B. die Steigerung der Wärmeeffizienz von Gebäuden berücksichtigt werden. Ein Neubau von einem Halmgutheiz(kraft)werk bedarf folglich einer sorgfältigen Planung.

Die Dimensionierung eines Halmgutheizwerkes muss an die Abnehmerstruktur am Standort angepasst sein, um eine hohe Auslastung zu erreichen. Am Standort sollten Wärmeabnehmer mit einem hohen ganzjährigen Wärmebedarf vorhanden sein. Als Standort eignen sich insbesondere landwirtschaftliche Betriebe mit Sauen- und Geflügelhaltung, die einen hohen ganzjährigen Wärmebedarf haben. Dadurch allein kann das hohe Stroh- und Heupotenzial in Deutschland aber nicht ausgenutzt werden. Für eine bessere Ausnutzung dieses Potenzials kommen Kleinstädte im ländlichen Raum in Frage, wo die Wärmeabnehmerdichte hoch ist.

Ein weiterer Vorteil bei Kleinstädten im ländlichen Raum sind die kurzen Transportwege für den Brennstoff. Hier ist zu empfehlen bereits in der frühen Planungsphase zu klären, woher der Brennstoff (Brennstofflieferbereitschaftserklärungen) bezogen werden kann, wie hoch der Stroh- und Heupreis in der Region ist und wie die Logistik erfolgen soll. Zudem sollten bereits mit Beginn der Entwurfsplanung die Vertragsverhandlungen mit Landwirten oder Strohlieferanten aufgenommen werden. Für einen wirtschaftlichen Betrieb des Halmgutheizwerkes ist außerdem eine hohe Brennstoffqualität erforderlich, um den Wartungsbedarf zu reduzieren und Ausfallzeiten zu vermeiden. Die Anforderungen an die Brennstoffqualität sollten unbedingt in den Verträgen berücksichtigt werden.

Bei der Brennstoffbereitstellung, insbesondere bei Stroh, sollten Aspekte der Nachhaltigkeit wie die Humusbilanz berücksichtigt werden. Eine Verminderung des Humusanteils im Boden wirkt sich zudem Ertragsmindernd auf Folgefrüchte aus und führt langfristig zu einer Senkung der Wertschöpfung im ländlichen Raum. Gleichzeitig wird die Klimaschutzleistung der Strohheizwerke gesenkt. Generell ist die Nutzung von Heu und Stroh in Heiz(kraft)werken mit einem hohen THG-Vermeidungspotential verbunden und kann damit zum Erreichen der Klimaschutzziele Deutschlands beitragen.

7.2 Handlungsbedarf der Politik zur Beförderung der Nutzung von Heu und Stroh in der Landwirtschaft

Im Rahmen von Gesprächen hat sich ergeben, dass insbesondere Komplikationen hinsichtlich der Genehmigung von Halmgutheiz(kraft)werken zu einem frühen Abbruch von neuen Projekten geführt hat. Die Genehmigungsverfahren solcher Anlagen sollten deswegen vereinfacht werden.

Zudem hemmt der geringe Gaspreis die Installation neuer Halmgutheiz(kraft)werke. Bei Honorierung Klimaschutzleistung von Halmgutheizwerken würde ihre Wettbewerbsfähigkeit deutlich gesteigert werden. Damit könnte der Ausbau von Halmgutheiz(kraft)werken und die Ausnutzung des Heu- und Strohpotenzials befördert werden. Darüber hinaus sinkt die Abhängigkeit der Halmgutheiz(kraft)werke von staatlichen Förderungen.

Des Weiteren sollte die geplante Senkung der Grenzwerte für Luftschadstoffe nach TA-Luft die vorgeschriebenen Grenzwerte der EU nicht unterschreiten, um in Deutschland keine Nachteile für die Neuinstallation von Halmgutheizwerken im Vergleich zu anderen EU-Ländern entstehen zu lassen.

8 Literaturverzeichnis

- Annen T., 2017: Erneuerung der Kritik an der Verwendung der Vollkostenrechnung in der Betriebsplanung. Nach Meinung einiger Autoren ist die Kennzahl "Direkt- und Arbeitserledigungskostenfreie Leistung" eine bessere Planungsgröße als der Deckungsbeitrag. Stimmt das? In: Berichte über die Landwirtschaft. Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft. BAND 95 Ausgabe 2. August 2017. Herausgegeben vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft. August 2017.
- Arndt U., Kilburg, Schulte, Staudinger, Vogt, Waninger, 2012: So klappt's mit dem Wärmeliefervertrag. Was bei der Vertragsgestaltung zu beachten ist. Hrsg.: C.A.R.M.E.N. e. V. Stand 19.01.2012. URL: www.carmen-ev.de/files/informationen/Waermeliefervertrag_Broschuere.pdf (Stand: 07.03.2012)
- BAFA (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle), 2018: (Stand:06.06.2018) Modellvorhaben Wärmenetzsysteme 4.0 MODUL II: Merkblatt zur Antragstellung und den förderfähigen Ausgaben. https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Waermenetze/waermenetze_node.html
- Biertümpfel A., R. Heydrich, T. Graf, A. Vetter, 2010: Düngung mit Presskuchen und Strohasche-Auswertung 14jähriger Versuchsergebnisse -. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Jena, 2010. <http://www.tll.de/ainfo/pdf/asch0210.pdf> (zugegriffen: April 2019)
- BioGrace-II, 2015: BioGrace-II GHG calculation tool - Version 3; Harmonised Calculation of Biofuel Greenhouse Gas Emissions in Europe, online seit May 2015. <http://www.biograce.net>. (zugegriffen: Januar 2019).
- Bioenergy Europe, 2018: Statistical Report, 2018 Edition, 198pp. www.bioenergyeurope.org.
- Bischoff R., J. Schlegel, T. Hering, 2019: Biomasseaschen statt Mineraldünger? Erste Ergebnisse der Gefäßversuche. Fachgespräch zur Verwertung naturbelassener Biomasseaschen im Rahmen des vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) geförderten Projektes "Biomasse-Asche-Monitoring (BAM)". <https://www.thueringen.de/th9/tlllr/wir/service/veranstaltungen/materialien/fachgespraeche/index.aspx> (zugegriffen: April 2019).
- BMU (Bundesministerium für Umwelt), 2012: J. Nitsch, T. Pregger, T. Naegler, D. Heide, D. Luca de Tena, F. Trieb, Y. Scholz, K. Nienhaus, N. Gerhardt, M. Sterner, T. Trost, A. von Oehsen, R. Schwinn, C. Pape, H. Hahn, M. Wickert, B. Wenz: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht (BMU - FKZ 03MAP146). Forschungsvorhaben DLR, IWES und IFNE im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (März 2012).
- BMWi (Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie), 2014: C. Lutz, A. Großmann, U. Lehr (GWS); D. Lindenberger, A. Knaut, R. Malischek, S. Paulus, C. Tode, J. Wagner (EWI); A. Kemmler, A. Ley, A. Piégsa, M. Schlesinger, S. Straßburg, S. Koziel (Prognos AG): Gesamtwirtschaftliche Effekte der Energiewende Projekt Nr. 31/13 im Auftrag des des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, Berlin.
- BMWi (Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie), 2019. Entwicklung von Energiepreisen und Preisindizes zu nominalen Preisen in Deutschland. Energiedaten Tabelle 26. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/Energiepreise-und-Energiekosten/energiedaten-energiepreise-1-xls.xlsx?__blob=publicationFile&v=25 Stand: 01.2019
- Brimle G., 2006: Behutsame Düngung erhöht die Artenvielfalt von Magerrasen. Ergebnisse eines 22-jährigen Versuchs auf der Schwäbischen Alb. Naturschutz und Landschaftsplanung 38, (2), 2006.

- Calderón C., 2018: Bioenergy Europe Statistical Report European Bioenergy Outlook. Presentation. 14th European Bioenergy Future Konferenz am 14. November in Hannover.
- CARMEN (Centrales Agrar-Rohstoff-Marketing- und Energie-Netzwerk), 2004: Planungshandbuch. C.A.R.M.E.N. e.V. (Hrsg.). Straubing 2004
- CARMEN (Centrales Agrar-Rohstoff-Marketing- und Energie-Netzwerk), 2016: Stroh als Alternative zu Energiemais. <https://www.carmen-ev.de/biogas/archiv/2087-stroh-als-alternative-zu-energiemais>. (zugegriffen: April: 2019)
- Ciais P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, J. Canadell, A. Chhabra, R. DeFries, J. Galloway, M. Heimann, C. Jones, C. Le Quéré, R.B. Myneni, S. Piao, P. Thornton, 2013: Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- DAFA (Deutsche Agrarforschungsallianz), 2013: Fachforum Grünland Forschungsstrategie der DAFA Entwurf vom 01.08.2013. <https://www.dafa.de/wp-content/uploads/FFG-2013-08-01-Strategieentwurf.pdf>.
- Dahms T., C. Oehmke, A. Kowatsch, S. Abel, S. Wichmann, W. Wichtmann, C. Schröder., 2017: Halmgutartige Festbrennstoffe aus nassen Mooren. 2. Auflage. Universität Greifswald. Institut für Landschaftsökologie.
- DBFZ (Deutsches Biomasse Forschungszentrum), 2014: DBFZ Report Nr. 13 – Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen zur Bioenergiebereitstellung. DBFZ, Leipzig 2012. ISSN: 2190-7943
- Dietze M., H. Heilmann, 2010. Wirtschaftlichkeit einer dezentralen Strohheizung in Mecklenburg Vorpommern. Zwischenbericht Fo-Nr.: 3/15. Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern.
- DIN EN 12831-1, 2017: Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 1: Raumheizlast, Modul M3-3; Deutsche Fassung EN 12831-1:2017
- Fehrenbach H., S. Köppen, S. Markwardt, R. Vogt, 2016: Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade (BioEm). Im Auftrag des Umweltbundesamtes (Hrsg.). Dessau-Roßlau, Februar 2016.
- Flessa H., A. Don, A. Jacobs, R. Dechow, B. Tiemeyer, C. Poeplau, 2018: Humus in landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands. Ausgewählte Ergebnisse der Bodenzustandserhebung Herausgeber: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), November 2018.
- FNR (Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V.), 2014a: Dachleitfaden Bioenergie „Grundlagen und Planung von Bioenergieprojekten“ 1. Auflage.
- FNR (Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V.), 2014b: Leitfaden Feste Biobrennstoffe 4. vollständig überarbeitete Auflage, Mai 2014.
- FNR (Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V.), 2018: Maisanbau in Deutschland. <https://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/bioenergie/biogas/maisbau-in-deutschland.html> (zugegriffen: April 2019)

- Hartmann H., 2009: Brennstoffzusammensetzung und -eigenschaften. In: Kaltschmitt M., H. Hartmann, H. Hofbauer (Hrsg.) Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, S. 333-373.
- Hoffstede U., M. Stelzer, H. Hahn, M. Beil, B. Krautkremer, J. Kasten, W. Beyrich, 2018: Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß §97 Erneuerbare-Energien-Gesetz Teilvorhaben II a: Biomasse, Zwischenbericht erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Fraunhofer, Kassel.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2018: Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above preindustrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty
- KfW (Kreditanstalt für Wiederaufbau), 2019a: Merkblatt Erneuerbare Energien "Premium". Stand: 01.2019. [https://www.kfw.de/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-\(Inlandsf%C3%B6rderung\)/PDF-Dokumente/6000002410-Merkblatt-271-281-272-282.pdf](https://www.kfw.de/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-(Inlandsf%C3%B6rderung)/PDF-Dokumente/6000002410-Merkblatt-271-281-272-282.pdf)
- KfW (Kreditanstalt für Wiederaufbau), 2019b: Erneuerbare Energien – Premium. Mit Kredit und Tilgungszuschuss in Wärme investieren. zugegriffen: April 2019. [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/Finanzierungsangebote/Erneuerbare-Energien-Premium-\(271-281\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/Finanzierungsangebote/Erneuerbare-Energien-Premium-(271-281)/)
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.), 2018: Kalkulationsdaten-Feldarbeitsrechner. Zugriffen: September 2018. <http://daten.ktbl.de/feldarbeit/entry.html>
- Koal P., T. Zicker, R. Bischof, J. Schlegel., R. Uptmoor, B. Eichler-Löbermann, 2019: Asche als alternativer Dünger? Agronomische Effektivität von Biomasse-Aschen als Phosphordünger. Fachgespräch zur Verwertung naturbelassener Biomasseaschen im Rahmen des vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) geförderten Projektes "Biomasse-Asche-Monitoring (BAM)" <https://www.thueringen.de/th9/tlllr/wir/service/veranstaltungen/materialien/fachgespraeche/index.aspx> (zugegriffen: April 2019)
- Köller H., C. Linke, B. Loibl, 2007: Bewirtschaftungssysteme und ihre Auswirkungen auf das Bodengefüge. In: Handbuch der Bodenkunde 28. Erg. Lfg. 12/07.
- Kuželicki D.B., 2018: COMMON AGRICULTURAL POLICY post-2020. Legislative proposal. DG Agriculture and Rural Development Unit D.4 – Environment, climate change, forestry and bio-economy. Presentation. 14th European Bioenergy Future Konferenz am 14. November in Hannover.
- Leible L., S. Kälber, G. Kappler, H. Oechsner, M. Mönch-Tegeder, 2015: Biogas aus Landschaftspflegegras. Möglichkeiten und Grenzen. KIT Scientific reports 7691. DOI: 10.5445/KSP/100004598.
- Linhart E., A. K. Dhungel, 2013: Das Thema Vermaisung im öffentlichen Diskurs. In: Band 91, Heft 2, August 2013. <http://dx.doi.org/10.12767/buel.v91i2>.
- LWK NI (Landwirtschaftskammer Niedersachsen), 2018: Strohpreis-Rechner (Excelanwendung). <https://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/6/nav/360/article/32400.html> (Zugriff: August 2018).
- Naumann D., 2019: Stoffliche Holz- und Pflanzenascheverwertung. Fachgespräch zur Verwertung naturbelassener Biomasseaschen im Rahmen des vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) geförderten Projektes "Biomasse-Asche-Monitoring (BAM)"

- <https://www.thueringen.de/th9/tlllr/wir/service/veranstaltungen/materialien/fachgespraeche/index.aspx> (zugegriffen: April 2019).
- Niedrist G., E. Tasser, C. Lüth, J. Dalla Via, U. Tappeiner, 2009: Botanisch-ökologische Untersuchungen des Wirtschaftsgrünlandes in Südtirol unter besonderer Berücksichtigung der Bergmähder. *Gredleriana* 9, 11-32.
- Neurauter R., M. Mölgg, M. Reinalter, 2004: Aschen aus Biomassefeuerungsanlagen – Leitfaden, 2. Auflage. Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Umweltschutz/Referat Abfallwirtschaft.
- Nussbaumer T., S. Thalmann, A. Jenni, J. Ködel, G. Gruneko, 2017: Planungshandbuch Fernwärme. Im Auftrag vom Bundesamt für Energie (Schweiz). Version 1.0 vom 25. April 2017. ISBN 3-90870505-30-4.
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development), 2018: Effective Carbon Rates 2018: Pricing Carbon Emissions Through Taxes and Emissions Trading, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264305304-en>.
- Obernberger I., H. Holzner, P. Ruckenbauer, 1997: Zusammensetzung, Verwendungsmöglichkeiten und Umweltverträglichkeit von Aschen aus Biomassefeuerungen. In: Energieverwertungsagentur (Hrsg): Highlights aus der Biomasseforschung 1996/1997, Tagungsband, Bundesministerium für Wissenschaft und Verkehr und Österreichischer Biomasse-Verband. 15 Seiten In: VDI Bericht 1319, pp.199-222, 1997, "Thermische Biomassenutzung - Technik und Realisierung", ISBN 3-18-0913 19-3, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf.
- Poeplau C., A. Don, 2015: Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops - a meta-analysis. *Agriculture Ecosystem & Environment* 200(1): 33-41.
- Poeplau C., A. Don, L. Vesterdal, J. Leifeld, B. van Wesemael, J. Schumacher, A. Gensior, 2011: Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone – carbon response functions as a model approach. *Global Change Biology* 17(7): 2415–2427.
- Siebertz K., D. van Bebber, T. Hochkirchen, 2010: Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE). Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010. DOI 10.1007/978-3-642-05493-8
- Schiemenz K., 2012: Nutzung von Biomasseaschen für die Phosphor-Versorgung im Pflanzenbau. Dissertation an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock. rosdok.uni-rostock.de/file/rosdok_disshab_0000000823/rosdok_derivate_0000004874/Dissertation_Schiemenz_2012.pdf (zugegriffen: April 2019)
- Schlegel J., R. Bischof, T. Hering, 2019: Betrachtung von Schad- und Nährstoffen im Rahmen des Biomasse-Asche-Monitorings (BAM) sowie rechtliche Voraussetzungen für eine Ascheverwertung. Fachgespräch zur Verwertung naturbelassener Biomasseaschen im Rahmen des vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) geförderten Projektes "Biomasse-Asche-Monitoring (BAM)". <https://www.thueringen.de/th9/tlllr/wir/service/veranstaltungen/materialien/fachgespraeche/index.aspx> (zugegriffen: April 2019)
- Topp A., 2009: Der Begriff der Fernwärme. In: Recht der Energiewirtschaft (RdE). RdE 4-5/2009. S. 133–138. Sonderdruck. Köln: Carl Heymanns Verlag, 2009.
- UBA (Umweltbundesamt), 2012: Globale Landflächen und Biomasse nachhaltig und ressourcenschonend nutzen. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/globale_landflaechen_und_biomasse_lang_deutsch_bf.pdf

- UBA (Umweltbundesamt), 2018: Grünlandschutz.
<https://www.bfn.de/themen/landwirtschaft/gruenlandschutz.html>. (zugegriffen: April 2019)
- UBA (Umweltbundesamt), 2019a: Assessment of bio-CCS in 2°C compatible scenarios. Final report. Dessau-Roßlau, April 2019. ISSN 1862-4359.
- UBA (Umweltbundesamt), 2019b: UBA, 2019a: Energiebedingte Emissionen (Stand: 21.03.2019),
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energiebedingte-emissionen#textpart-1> (Zugegriffen: April 2019)
- Van Loo S., J. Koppejan (Eds), 2008: The handbook of biomass combustion & co-firing. Earthscan, London
- Volpi G., 2018: EU bioenergy sustainability framework post-2020. Presentation. 14th European Bioenergy Future Konferenz am 14.November in Hannover.
- Zinke O., 2019: Heu und Stroh: Preise könnten bald kippen. Agrarheute.
<https://www.agrarheute.com/markt/futtermittel/heu-stroh-preise-koennten-bald-kippen-553273>. Stand. 18.04.2019