

PALUDI
KULTUR



GREIFSWALD

Bioenergie aus nassen Mooren

Thermische Verwertung von Biomasse aus Paludikultur



GREIFSWALD
MOOR
CENTRUM

UNIVERSITÄT GREIFSWALD
Wissen lockt. Seit 1456



Bioenergie aus nassen Mooren

Thermische Verwertung
von halmgutartiger Biomasse
aus Paludikultur

Maxilimian Wenzel, Guy Kabengele, Tobias Dahms,
Mirko Barz & Wendelin Wichtmann



Inhalt

1.	Vorwort	4
1.1	Paludikultur-Biomasse zur Energiebereitstellung	5
1.2	Begründung für energetische Verwertung von Paludikultur-Biomasse	6
1.3	Wärme aus dem nassen Moor – Das Projekt BOnaMoor	8
2.	Ergebnisse und Empfehlungen	9
2.1	Wie kann die beste Biomasse-Qualität erreicht werden?	9
2.1.1	Qualitätsanforderungen von thermischen Anlagen an den Brennstoff	
2.1.2	Einflussfaktoren auf die Brennstoffqualität	
2.1.3	Beeinflussung der verbrennungskritischen Inhaltsstoffe	
2.1.4	Lösungen und Empfehlungen	
2.2	Thermische Verwertung – Paludikultur-Biomasse effektiv verbrennen	22
2.2.1	Grundlagen und Stand der Technik	
2.2.2	Verbrennungstechnische Untersuchungen	
2.2.3	Fazit und Empfehlungen	
2.3	Ökonomie/Ökobilanz mal durchgerechnet: So lohnt es sich für Betrieb und Klima	38
2.3.1	Ernte, Aufbereitung und Lagerung/Brennstoffbereitstellung	
2.3.2	Ökonomie	
2.3.3	Ökobilanzielle Bewertung	
2.3.4	Empfehlungen	
3.	Fazit/zusammenfassende Empfehlungen	49
4.	Literaturhinweise/Links	51
5.	Nachweise für Abbildungen und Tabellen	54

1. Vorwort

Moore bestehen weitgehend aus abgestorbenem Pflanzenmaterial (Torf), das im Wesentlichen durch den unvollständigen Abbau von Pflanzenresten unter wassergesättigten Bedingungen entstanden ist. Sie sollten eine Torfmächtigkeit von mehr als 30 cm und einen Gehalt an organischem Kohlenstoff von mindestens 20 % aufweisen (entsprechend 40 % organische Substanz). Einen aktuellen Überblick über Moore in Europa geben Joosten et al. (2017). Etwa 98 % der Moore in Deutschland werden entwässert, um sie als Grünland oder Acker bewirtschaften zu können. Dies ist mit enormen Treibhausgas- und Nährstoffemissionen verbunden. Werden diese entwässerten Moore wiedervernässt, können sie in Paludikultur, d.h. bei Wasserständen in Flurhöhe, bewirtschaftet werden. Dabei wird Biomasse für verschiedenste Verwertungsoptionen produziert. Nach Wiedervernässung für den Klimaschutz werden in Zukunft mehrere hunderttausend Hektar wiedervernässter Moore in Deutschland für eine „nasse Bewirtschaftung“ zur Verfügung stehen. Neben der stofflichen Verwertung bestehen für die energetische Verwertung der zu erntenden Biomasse große Potentiale (Närmann et al. 2021).

Das Verbundprojekt BOnaMoor untersucht Möglichkeiten der Optimierung von Bereitstellung, Aufbereitung und thermischer Verwertung der Biomasse von nassen Moorstandorten. Ausgehend von der bisherigen Nutzung im Rahmen der Landschaftspflege sowie der thermischen Verwertung von Landschaftspflegeheu verfolgt das Projekt BOnaMoor das Ziel, die Produktion von Energiebiomasse auf nassen Niedermoorstandorten (Paludikultur) zu optimieren und weiter zu entwickeln.

Die vorliegende Broschüre ist aus dem durch das Bundeslandwirtschaftsministerium (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) geförderte BOnaMoor-Projekt (Biomasseproduktion und Optimierung auf nassen Moorstandorten und deren thermische Verwertung, Moornutzung unter Berücksichtigung von Klimaschutz, Ressourcenschutz und ländlicher Entwicklung) heraus

entstanden. Sie stellt ausgewählte Ergebnisse vor und gibt aus dem Blickwinkel von ganz unterschiedlichen Fachdisziplinen (Vegetationsökologie, Energietechnik, Ökonomie) Empfehlungen für die thermische Verwertung von Paludikultur-Biomasse.

Box 1: Halmgut aus Paludikultur für die thermische Verwertung

Während der Anteil der Erneuerbaren Energien im Stromsektor in den letzten Jahren in Deutschland stetig angestiegen ist (2020 etwa auf 45%), sind im Wärmesektor kaum Steigerungen zu verzeichnen gewesen. Der Anteil Erneuerbarer Energien beträgt hier derzeit nur etwa 15 %, wovon 65 % aus der Verbrennung von Holz resultieren. Halmgut wird derzeit nur in wenigen Fällen als Brennstoff zur Wärmeerzeugung eingesetzt. Die Ursache hierfür liegt in den erhöhten logistischen Anforderungen der Bereitstellung der Brennstoffe (Ernte, Transport, Kompaktierung und Lagerung etc.), am vielfach hohen Gehalt an kritischen und unerwünschten Brennstoffbestandteilen und den daraus resultierenden Anforderungen an die Feuerungstechnik, sowie an den erhöhten genehmigungsrechtlichen Anforderungen. So sind Halmgutverbrennungsanlagen im Gegensatz zu Holzfeuerungsanlagen bereits ab 100 kW Feuerungsleistung genehmigungsbedürftig und unterliegen damit den höheren Emissionsanforderungen der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA-Luft). Nichtsdestotrotz besteht seitens der Biomasse-Heizwerk-/Heizkraftwerksbetreiber ein großes Interesse an der Erschließung dieser alternativen Brennstoffpotentiale. Neben herkömmlichen landwirtschaftlichen Reststoffen und Produkten wie Getreidestroh oder Landschaftspflegematerialien bietet auch eine neue innovative landwirtschaftliche Nutzung nach der Wiedervernässung von Mooren beträchtliche Potentiale zum Erzeugen halmgutartiger Biomasse.

1.1 Paludikultur-Biomasse zur Energiebereitstellung

Paludikultur ist die Bewirtschaftung nasser und wiedervernässter Moore. Ziel ist es, die nassen Standorte wirtschaftlich zu nutzen und gleichzeitig Treibhausgas- und Nährstoffemissionen zu vermeiden. Das geschieht, indem Moore wiedervernässt und nass gehalten werden. Dabei werden gleichzeitig fossile Energieträger ersetzt. Die Biomasse aus wiedervernässten Mooren lässt sich einerseits energetisch nutzen, z.B. als Brennstoff, als Substrat für die Biogasproduktion oder für die Produktion von flüssigen Energieträgern. Infrage kommen Pflanzenarten wie Schilf, Rohrkolben, Rohrglanzgras oder Seggenarten, die auf nassen Standorten beträchtliche Erträge liefern können. Daneben kann aus Paludikultur gewonnene Biomasse (Paludikultur-Biomasse) auch stofflich als nachwachsender Rohstoff für viele Anwendungen wie z.B. Baustoffe, Verpackungsmaterialien, Erden und Komposte verwertet werden. Viele Faktoren beeinflussen den potenziellen Nutzen, wie z.B. die Energieeffizienz, das Management von Reststoffen und die geringeren negativen Umweltauswirkungen im Vergleich zu anderen biogenen Rohstoffen.

In jüngster Zeit hat die Nutzung von Biomasse aus wiedervernässten Mooren als potenziell günstige und effiziente erneuerbare Energiequelle viel Aufmerksamkeit auf sich gezogen (Box 1). Das Fachbuch „Paludikultur – Bewirtschaftung nasser Moore“ gibt bereits einen umfassenden Gesamtüberblick über energetische Verwertungsoptionen für Paludikultur-Biomasse (Wichtmann et al. 2016). Neben einer Verwertung in der Biogasanlage (Martens et al. 2021, Czubaszek et al. 2021) kommt vor allem die thermische Verwertung in Heiz(kraft)werken infrage. Die Broschüre „Halmgutartige Festbrennstoffe aus nassen Mooren“ gibt eine umfassende Darstellung der Möglichkeiten der thermischen Verwertung von Biomasse aus standortgerechter Moorbewirtschaftung, v.a. hinsichtlich der Pelletierung und Verbrennung in kleineren und mittleren Feuerungsanlagen (Dahms et al. 2017).

Die Verwertbarkeit der Biomasse von Feuchtgebietspflanzen hängt von verschiedenen Faktoren ab: z.B. von der dominierenden Pflanzenart, der Nährstoffversorgung, dem Erntezeitpunkt und dem Wassergehalt. In der Regel ist der Energie-Ertrag etwas geringer als der von herkömmlichen biogenen Rohstoffen, wie z.B. Holz (thermische Verwertung) oder Maissilage (Biogas). Es ist davon auszugehen, dass Paludikultur-Biomasse in moorreichen Regionen eine Komplementierung von konventionellen Bioenergieträgern übernehmen wird. Im Folgenden wird die thermische Verwertung von halmgutartiger Paludikultur-Biomasse näher betrachtet.

1.2 Begründung für energetische Verwertung von Paludikultur-Biomasse

Um die im Pariser Klimaschutzabkommen 2015 und im Klimaschutzgesetz der Bundesregierung von 2021 gesetzten Ziele der Klimaneutralität in Deutschland bis 2045 erreichen zu können, sind alle Sektoren gefordert, ihre Treibhausgasemissionen auf ein Minimum zu reduzieren und Treibhausgasemissionen auszubauen. Große Potentiale zum Vermeiden von Emissionen im Landnutzungssektor werden in der Wiedervernässung von Mooren und dem Ersatz fossiler Energieträger durch Biomasse aus nassen Mooren gesehen. In der Land- und Forstwirtschaft hat die direkte Verbrennung von Biomasse als erneuerbarem Energieträger einen traditionellen Stellenwert, worauf weitere Entwicklungen aufbauen können.

Die Bioenergie springt dort ein, „wo andere Klimaschutzaktivitäten an ihre Grenzen stoßen“. Für abgelegene Gebiete wird sie auch nach 2045 weiterhin ein wichtiges Standbein für die Versorgung mit Wärme und ggf. Strom im ländlichen Raum darstellen. Die Nutzung von Biomasse als Brennstoff ist aber vor allem als eine Übergangstechnologie anzusehen, die mittelfristig durch eine stoffliche bzw. eine Kaskadennutzung abgelöst werden wird. Biomasse aus nassen Mooren bietet neben Nutzungsformen, die nicht auf die spezifischen Eigenschaften der Pflanzenarten zugeschnitten sind, auch das Potential für Nutzungen, die von den besonderen Eigenschaften der Pflanzen profitieren. Ein Beispiel ist die Nutzung von Schilfblättern als Rohstoff für die Herstellung von Anoden für Batterien (Liu et al. 2015; Zhao et al. 2020) oder die stoffliche Verwertung zum Beispiel im Baustoffbereich (Abbildung 1, oben, Nordt et al. 2020). Diese Nutzungsformen befinden sich aber derzeit lediglich in Entwicklung bzw. wurden bisher nur in Pilotstudien durchgeführt.

Demgegenüber bietet die Brennstoffnutzung verschiedene Vorteile. Der Bedarf und Markt für Wärme ist vorhanden und die Technik existiert bereits und ist erprobt.

Der Heizwert der Biomasse ist vergleichbar mit Holz, wobei demgegenüber ein deutlicher Klimaschutz-Vorteil besteht, (siehe Box 5) und die Effizienz beim Umwandeln zu Wärme hoch ist. Brennstoff kann insbesondere die Paludikultur-Biomasse liefern, deren Qualität eine stoffliche Verwertung nicht zulässt. Paludikultur-Biomasse ist speicherbar und die Erträge pro Hektar sind vergleichsweise hoch (Tabelle 4).

Gegenüber fossilen Brennstoffen, wie Erdgas und Heizöl, hat Biomasse im Allgemeinen und Halmgut im Besonderen verschiedene Nachteile. Die Nutzung ist mit deutlich höheren Investitions- und Betriebskosten verbunden. Die Inhaltsstoffe in der Biomasse (Tabelle 3, Tabelle 8) erfordern eine spezielle Anpassung der Anlage an den



Abb. 1: Beispiele für die stoffliche (oben) und energetische (unten) Verwertung von Biomasse aus nassen Mooren (Foto oben: S. Melchior, Foto unten: T. Dahms)

Brennstoff und der Emissionsschutz erfordert spezielle Filteranlagen. Die Brennstoffeigenschaften können jedoch durch eine späte Ernte und Durchregnen der Biomasse nach der Mahd deutlich verbessert werden (Kapitel 2.1).

Die energetische Verwertung von Biomasse kann für die kommenden 30 Jahre als Übergangstechnologie eine zusätzliche Alternative zu fossilen Energieträgern auf emissionsarmen Transformationspfaden zu einer kohlenstoffneutralen Volkswirtschaft sein. Die Nutzung von Holz als Biobrennstoff, insbesondere aus empfindlichen Naturwäldern und Kahlschlägen, scheint keine nachhaltige Alternative darzustellen (siehe Box 5). Die entwässerten Moore müssen in den nächsten Jahren

aus Klimaschutzgründen weitestgehend wiedervernässt werden. Es ist davon auszugehen, dass viele der betroffenen landwirtschaftlichen Betriebe Interesse haben werden, die Bewirtschaftung ihrer wiedervernässten Moorböden fortzuführen und damit eine Offenhaltung der Landschaft zu bewirken. Insofern erschließt sich ein großes Flächenpotential, auch wenn naturschutzfachliche und wasserwirtschaftliche Restriktionen eine Umstellung auf Paludikultur auf einem Teil der wiedervernässten Moore erschweren. Es wird angenommen, dass für die zukünftig anfallende Biomassemenge die energetische Verwertung kurzfristig eher realisierbar ist, als eine stoffliche Verwertung. Jedoch ist die energetische Verwertung mit einer geringeren Wertschöpfung verbunden.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der energetischen und stofflichen Verwertung im Vergleich

Verwertung	Abnahmemenge der Biomasse	Biomassequalität, -kriterien	Anlagen
Energetisch	Unbegrenzt, Wärme- und Gasmarkt vorhanden	Unspezifisch, Kritische Inhaltsstoffe	Anpassung Bestand (Biogasanlagen, Biomassekessel)
			Neubau: Fördermöglichkeiten
Stofflich	Markt muss gleichzeitig entwickelt werden	Spezifisch (Reinbestände)	Bisher nur im Versuchsmaßstab
	Ggf. stufenweise Entwicklung	Inhaltsstoffe Physikalische Eigenschaften	Neubau

1.3 Wärme aus dem nassen Moor – Das Projekt BOnaMoor

Ein großes Potential für den Beitrag zu den 20-20-20-Zielen der EU² liegt in der Produktion von Biomasse aus Paludikultur. Diese kann eine wichtige Rolle spielen, um fossile Brennstoffe zu ersetzen. Geeignete Paludikultur-Pflanzenarten für die Energieproduktion sind hochwassertolerante, produktive Feuchtgebietsarten wie Schilf, Seggen, Rohrkolben und Rohrglanzgras. Die Biomasse von einem Hektar Schilf (Winterertrag = 8 t Trockenmasse (TM)) entspricht einem Energiegehalt von etwa 3.000 Liter Heizöl.

Das Verbundprojekt BOnaMoor untersuchte Möglichkeiten, das Bereitstellen, Aufbereiten und thermische Verwerten der Biomasse von nassen Moorstandorten zu optimieren. In Verbrennungsversuchen mit verschiedenen Brennstoffen wurden im Biomasseheizwerk Malchin der Agrotherm GmbH die thermische Verwertung von Niedermoorbiomasse evaluiert und optimiert, um die Grundlage für die Übertragbarkeit dieser Stoffstromkette zu legen. Die Hochschule für Technik und Wirtschaft in Berlin begleitete die Versuche wissenschaftlich durch Messungen vor Ort und Laboruntersuchungen, um Empfehlungen zur Optimierung der Wärmeproduktion bei der Verfeuerung von Halmgütern abzuleiten.

Die Universität Greifswald untersuchte den Einfluss des Erntezeitpunktes auf die Brennstoffqualität sowie den Nährstofftransfer, der mit der Biomasse reguliert werden kann. Die Wissenschaftler untersuchten in den Moorwiesen bei Neukalen (Mecklenburg-Vorpommern) die Auswirkungen unterschiedlicher Erntetermine auf die Biomassequalität. Daneben analysierten sie die Wirtschaftlichkeit von Ernte und Verwertung der Biomasse für die betrachteten Stoffstromketten im Rahmen von Betriebszweiganalysen. Für die Produktionsverfahren und die thermische Verwertung der Biomasse erstellten sie zudem eine Ökobilanz, um Optimierungsmöglichkeiten aus Sicht des Klimaschutzes

herauszuarbeiten. Wissensaufbereitung und individuelle Beratung zum Praxistransfer waren weitere wichtige Bausteine des Projektes und Grundlage für Handlungsempfehlungen, die eine Übertragung des Ansatzes unterstützen. Dabei wurden aus den verschiedenen fachlichen Blickwinkeln heraus Managementempfehlungen für die Rohstoffbereitstellung erarbeitet, die im Folgenden vorgestellt werden.

2. Ergebnisse und Empfehlungen

2.1 Wie kann die beste Biomasse-Qualität erreicht werden?

2.1.1 Qualitätsanforderungen von thermischen Anlagen an den Brennstoff

Die thermische Nutzung halmgutartiger Biomasse stellt besondere Anforderungen an die Feuerungstechnik, welche seit einigen Jahren intensiv erforscht und erprobt wird. Eine Einordnung der relevanten Qualitätseigenschaften biogener Festbrennstoffe erfolgt in Tabelle 2 (Hartmann et al. 2000).

Aber welchen konkreten Einfluss hat die Herkunft der Biomasse auf die Verbrennungseigenschaften? Welche Gemeinsamkeiten und welche Unterschiede gibt es zwischen biogenen Brennstoffen wie klassischen Holzhackschnitzeln, Getreidestroh, gemischtem Landschaftspflegematerial und diversen Pflanzenarten aus Paludikultur? Wie beeinflussen der Wasserstand in der Fläche oder die Vegetationszusammensetzung die Brennstoffqualität? Generell sind homogene Brennstoffe mit gleichbleibender Brennstoffqualität, beispielsweise Holzhackschnitzel, ideal für die thermische Verwertung in einem Heizkessel. Nur wenige äußere Faktoren können in geringem Maße eine Schwankung der verbrennungskritischen Inhaltsstoffe von Holz beeinflussen.

Halmgutartige Biomasse ist jedoch im Vergleich zu Holz weniger homogen und weist höhere Anteile an

Asche und kritischen Inhaltsstoffen auf (Vetter 2001). Besonders hervorzuheben sind hierbei die Elemente Stickstoff (N), Kalium (K) und Chlor (Cl). Diese haben einen starken Einfluss auf die Emissionswerte oder sind an der Bildung von störenden Schlacken, Schad- oder Korrosionsstoffen beteiligt. Weitere Elemente wie Schwefel (S), Phosphor (P), Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Natrium (Na) und Silizium (Si) sind für die Verschlackung des Brennraums und die Bildung von Abgasen oder für die Feinstaubbildung relevant. Im Falle der Feinstaubemissionen sind die Schwer- bzw. Übergangsmetalle Blei (Pb) und Zink (Zn) ebenfalls zu beachten.

Der Wassergehalt der Biomasse stellt einen weiteren Qualitätsfaktor dar. Wird halmgutartige Biomasse von wiedervernässten Moorböden mit angepasster herkömmlicher Technik in Form von Rundballen, ähnlich wie Weizenstroh, geborgen, kann dies nur zu bestimmten Zeitfenstern im Jahr und bei relativ niedrigen Wasserständen erfolgen. Bei ganzjährig hohen Wasserständen stößt die herkömmliche Technik jedoch an ihre Grenzen. Da bei hohem Wassergehalt der Biomasse die Transportkosten steigen und der Heizwert sinkt, ist eine Trocknung bereits auf dem Feld aus betriebswirtschaftlicher Sicht wünschenswert. Bei höheren Wasserständen ist eine Bodentrocknung im Schwad nicht mehr möglich und Raupentechnik kann für das Einholen der Ernte nötig werden. Bei in Ballenform gelagerter Biomasse mit einem erhöhten Wassergehalt besteht die Gefahr der Selbstentzündung (Thrän et al. 2016). Die Bergung von geeigneter Biomasse aus Paludikultur für die thermische Verwertung kann sehr umständlich sein und ist von vielen Faktoren, allen voran von den individuellen Gegebenheiten auf der Fläche, abhängig. Geeignete Ernteverfahren werden in Kapitel 2.3.1 (Ernte, Aufbereitung und Lagerung/Brennstoffbereitstellung) behandelt.

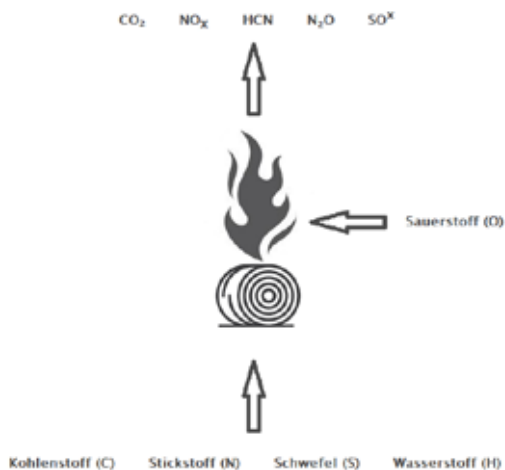


Abb. 2: Schematische Darstellung der emissionsbildenden Elemente (unten) und den daraus im Verbrennungsprozess entstehenden Molekülen (oben) bei Zuführung von Sauerstoff (rechts)

Tabelle 2: Qualitätsparameter biogener Festbrennstoffe und deren verbrennungsrelevanten Auswirkungen (verändert nach Hartmann et al. 2000)

Qualitätsparameter	Auswirkung
chemische	
Stickstoff (N)	Stickoxid (NO _x)-, Cyanwasserstoff (HCN)- & Distickstoffmonoxid (N ₂ O)-Emission
Kalium (K)	Ascheerweichungsverhalten, Hochtemperaturkorrosion
Chlor (Cl)	Emission von Organochlorverbindungen und Chlorwasserstoff (HCl), Hochtemperaturkorrosion
Schwefel (S)	Schwefeloxid (SO _x)-Emission, Hochtemperaturkorrosion
Magnesium (Mg), Calcium (Ca)	Ascheerweichungsverhalten, Schadstoffe, Ascheverwertung
Blei (Pb), Zink (Zn)	Ascheverwertung, Schwermetallemission
brennstoffechnische	
Heizwert	Energetischer Brennstoffwert
Wassergehalt	Heizwert, Lager- und Transportfähigkeit, Gewicht, Selbstentzündung, Verbrennungstemperatur
flüchtige Bestandteile	Brennverhalten
Aschegehalt	Partikelemission, Rückstandsbildung und -verwertung
Ascheschmelzverhalten	Schlackebildung und -ablagerungen, Wartungsbedarf
physikalische	
Größe, Form	Zuordnung zu Beschickungsvarianten und Feuerungsanlagentypen, Aufbereitungsbedarf
Korngrößenverteilung/Feinanteil	Störungen in Förderelementen, Rieselfähigkeit, Brückenbildungsneigung, Belüftungs-/Trocknungseigenschaften, Staubemission
Rohdichte	Schüttdichte, pneumatische Fördereigenschaften, Brenneigenschaften (Zündtemperatur, Brenngeschwindigkeit etc.)
Schütt- oder Stapeldichte	Transport- und Lagerungsaufwendungen, Brenneigenschaften, Leistung der Förderelemente, Brennstoffbunkergröße etc.
Abriebfestigkeit	Feinanteil (Staubemission, Entmischung)
Brückenbildungsneigung	Rieselfähigkeit, Störungen bei Umschlagprozessen

2.1.2 Einflussfaktoren auf die Brennstoffqualität

Biomasse aus Paludikultur ist alleine aufgrund der Herkunft vielen äußeren Einflüssen ausgesetzt und kann stark schwankende Brennstoffqualitäten aufweisen. Ein Vergleich der wichtigsten für die Schwankungen der Qualität verantwortlichen Faktoren von Biomasse aus Paludikultur und Holzhackschnitzeln gibt bereits einen Einblick:

1 Vegetation

Holzhackschnitzel bestehen in der Regel aus sehr homogenem Material. Sonstige Brennstoffe wie Weizenstroh oder andere landwirtschaftliche Erzeugnisse besitzen ebenfalls eine sehr hohe Homogenität. Biomasse aus Paludikultur ist, z.B. im Falle von Landschaftspflegematerial, unter Umständen sehr heterogen und enthält viele verschiedene Pflanzenarten. Diese akkumulieren unterschiedliche Mengen an verbrennungskritischen Inhaltsstoffen.

2 Wasserstände

Der Grundwasserspiegel spielt für die Qualität von Holzhackschnitzeln keine so besondere Rolle wie für Biomasse aus Paludikultur. Mit zeitweiser Überstauung der Paludikultur-Flächen (z.B. Überschwemmungen) können jedoch Inhaltsstoffe eingetragen, oder die Brennstoffqualität im Allgemeinen verschlechtert werden. Möglich wäre zum Beispiel die Eintragung von Kalium (K) über belastete Oberflächengewässer, was eine Verschlechterung der Brennstoffqualität mit sich bringen würde. Andere Nährstoffe können ebenfalls eingetragen werden, was jedoch nicht automatisch als negativ zu bewerten ist. Eine Verbesserung der chemischen Zusammensetzung der Biomasse, z.B. durch Auswaschen kritischer Inhaltsstoffe wie Chlor (Cl) über Niederschläge ist ebenfalls möglich. In jedem Fall bilden schwankende Wasserstände einen Unsicherheitsfaktor für die Brennstoffqualität.

3 Erntetermin

Der Zeitpunkt der Entnahme von Holz als Brennstoff ist für die Brennstoffqualität kaum wichtig. Dasselbe trifft auf die meisten anderen herkömmlich genutzten Brennstoffe zu, die beispielsweise als Reststoff nach der Ernte der Hauptfrucht anfallen. Im Falle von Paludikultur- oder auch Landschaftspflegematerial wurde jedoch bereits in diversen Studien ein Zusammenhang zwischen verschiedenen Ernteterminen und einer Veränderung in der Qualität und Quantität bei kritischen Inhaltsstoffen in der Biomasse festgestellt.

4 Nutzungshistorie des Standortes

Im Falle von wiedervernässten Mooren ist die Nutzungshistorie des Standorts als entwässerte landwirtschaftliche Produktionsfläche möglicherweise ein bisher kaum beachteter Faktor. Beispielsweise könnte, wie von Gensior & Zeitz (1999) bereits beschrieben, die bei der ackerbaulichen Bewirtschaftung der Moore in früheren Zeiten übliche Verwendung von Stoffen wie Arsen (As) und Quecksilber (Hg) zum Beizen von Saatgut, das auf den entwässerten Moorböden zum Einsatz kam, einen Einfluss auf die Brennstoffqualität haben. Diese Stoffe könnten nach einer Wiedervernäsung remobilisiert werden, in die oberirdischen Pflanzenteile gelangen und sich dort akkumulieren.

Tabelle 3: Eigenschaften von Paludi-Pellets im Vergleich zu biogenen Festbrennstoffen; Daten aus: 1 = Osowski et al. 2004; 2 = Thrän et al. 2001; 3 = Dahms et al. 2017; 4 = Tonn et al. 2008; TM = Trockenmasse; FM = Frischmasse

Parameter	Einheit	Paludi-Pellets	Holz	Weizen-Stroh	Landschaftspflege-Material
physikalisch					
Heizwert	MJ/kg	17,4 – 19 ³	18,4 – 19,2 ¹	15,8 – 17,7 ¹	18,3 – 19,5 ⁴
Aschegehalt	% in TM	1,3 – 6,3 ³	0,5 – 3,8 ¹	3,8 – 12,2 ¹	5,96 – 8,94 ⁴
Wassergehalt	% in FM	8 – 13 ³	7 – 20 ²	21 ²	17 ²
chemisch					
Stickstoff (N)	% in TM		0,13 – 0,54 ¹	0,42 – 1,11 ¹	1,29 – 1,80 ⁴
Schwefel (S)	% in TM		0,056 – 0,27 ¹	0,056 – 0,27 ¹	0,13 – 0,17 ⁴
Kalium (K)	% in TM		0,08 ²	0,88 ²	1,01 – 1,50 ⁴
Chlor (Cl)	% in TM		0,004 ²	0,15 ²	0,25 – 0,37 ⁴

Für die Praxis bedeutet die Verwendung von Biomasse aus Paludikultur als Festbrennstoff in jedem Fall eine Herausforderung. Durch die oben genannten äußeren Faktoren verändern sich die Beschaffenheit, die (Weiter-)Verarbeitbarkeit zu Ballen oder Häckseln, der Brennwert, die Inhaltsstoffe und der Ertrag. Neben diesen eher indirekten Faktoren stehen zur Verwertung als Brennstoff jedoch bestimmte chemische Eigenschaften in direktem Zusammenhang zum reibungslosen Ablauf des Verbrennungsvorganges. Generell haben Stroh und andere Halmgüter höhere Schwefel-, Stickstoff-, Chlor- und Aschegehalte als Holz (siehe Tabelle 3). Dementsprechend werden unter Umständen höhere Emissionen an Schwefeldioxid (SO₂), Stickoxid (NO_x), Chlorwasserstoff (HCl), Dioxinen, Furanen und (Fein-)Staub freigesetzt. Das Einhalten der Grenzwerte für Biomasse-Heizwerke nach TA-Luft und Richtlinien des Bundesimmissionsschutzgesetzes (BImSchV) wird in Kapitel 2.2.5 behandelt. Im Allgemeinen lassen sich die verbrennungskritischen Elemente in die folgenden drei Gruppen einordnen:

1 Nährstoffe

Die Hauptnährelemente Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) bilden abgesehen von Kohlenstoff (C) und Wasser (H₂O) den mengenmäßig größten Anteil an der Pflanzenbiomasse. Ein hoher Stickstoffgehalt führt bei der Verbrennung zu erhöhten Emissionen von Stickoxiden. Diese können um das Zwei- bis Vierfache erhöht sein (Hartmann 2001). Dahms et al. (2017) zeigten für Seggen-Pellets aus Sommerernte bereits, dass hier Probleme mit der Einhaltung von Grenzwerten auftreten können. Der Phosphorgehalt beeinflusst das Ascheschmelzverhalten, spielt jedoch aufgrund der Mengenverteilung eine untergeordnete Rolle. Das Ascheschmelzverhalten wird maßgeblich von dem Kaliumgehalt bestimmt. Kalium (K) ist Bestandteil von

Silikatschlacken, die bei einem niedrigen Ascheschmelzpunkt zu vermehrter Verschlackung unter anderen Problemen im Kesselraum führt (Strandberg et al. 2019). Der Brennstoff beginnt bei Verschlackung an zu fließen und kann im Kesselraum anbacken und ist nicht so leicht wieder vom Rost zu entfernen.

2 Weitere Elemente

Für die oben bereits genannte Schlackenbildung ist der Gehalt des Elements Silizium (Si) ein weiterer Faktor. Hohe Siliziumgehalte in der Biomasse begünstigen die Schlackenbildung. Die Ascheschmelztemperatur wird durch höhere Konzentrationen von Calcium (Ca) und Magnesium (Mg) in der Biomasse erhöht. Diese Elemente setzen die Schmelztemperatur herauf, hemmen die Schlackenbildung und verbessern somit den Verbrennungsbetrieb. Die Aufnahme von Chlor (Cl) in Pflanzen korreliert stark mit der Aufnahme von Kalium (K) (Vetter 2001). Hohe Chlorkonzentrationen bedingen durch Säurebildung erhöhte Korrosionsschäden im Kesselraum und den abgasführenden Rohren und bilden gleichzeitig giftige Emissionen von Chlorwasserstoff (HCl), Feinstaub, Dioxinen und Furanen (Dahms et al. 2017). Schwefel (S) und Natrium (Na) sind an der Bildung von Abgasen wie beispielsweise Schwefeldioxid (SO₂) und Feinstaubemissionen beteiligt.

3 Schwer- und Übergangsmetalle

Blei (Pb) und Zink (Zn) finden sich neben anderen Elementen aus diesen Stoffgruppen in halmgutartiger Biomasse wieder. Diese stammen meist aus Einträgen über Luft oder Wasser, akkumulieren in der Biomasse und bilden anschließend wiederum schädliche Feinstaubemissionen während des Verbrennungsvorganges. Elemente dieser Stoffgruppe sind zusätzlich kritisch für die Ascheverwertung.

Box 2: Der Landwirtschaftsbetrieb „Moorhof“ in Neukalen

Der „Moorhof“ in Neukalen ist einer der ersten Landwirtschaftsbetriebe Deutschlands, der sich auf die Bewirtschaftung von nassen Mooren spezialisiert hat. Auf ca. 400 ha feuchter bis nasser Moorfläche werden Heu-Ballen geworben.

Die Flächen des „Moorhof“ haben zum Großteil einen naturschutzfachlichen Schutzstatus, sie sind Teil des Naturschutzgebiets (NSG) Peenetal von Salem bis Jarmen. Die hohen Wasserstände auf den Flächen ermöglichen die Ausbildung großer Bestände von Nasswiesen mit hoher Biodiversität (Abbildungen 3 und 5). Neben Pflanzenarten wie z.B. dem breitblättrigen Knabenkraut (*Dactylorhiza majalis* RCHB.) (Abbildung 4) kommen viele seltene Insektenarten (Abbildung 3, Box 1) und Vertreter der Watvögel wie z.B. die Bekassine (*Gallinago gallinago* L.) vor. Das Einstellen der Entwässerung auf diesen Flächen spart im Vergleich zu nährstoffreichen, entwässerten Niedermoores durchschnittlich 18 t CO₂-Äq.³ pro Hektar und Jahr.

Die Flächen werden mit Hilfe von angepasster, herkömmlicher Landtechnik genutzt. Besonders breite Reifen in und ein möglichst günstiges Verhältnis von Gewicht zu Leistung ermöglichen es, mit den Maschinen zu bestimmten Zeitfenstern auf die Flächen zu fahren, ohne Bodenschäden anzurichten. Ein ausgeklügeltes Erntemanagement, erfahrene Mitarbeiter und eine große Prise Mut stellen den Erfolg sicher. Die Biomasse wird hauptsächlich zur thermischen Verwertung an das Biomasseheizwerk der Agrotherm GmbH verkauft (siehe 2.2.3).



Abb. 3: Die große Königslibelle, *Anax imperator* (Foto: Maximilian Wenzel)

Abb. 4: Das breitblättrige Knabenkraut, *Dactylorhiza majalis* (Foto: Maximilian Wenzel)

Abb. 5: Artenreiche Nasswiese (Foto: Maximilian Wenzel)

2.1.3 Beeinflussung der verbrennungskritischen Inhaltsstoffe

Für das BOnaMoor Projekt wurde die Biomassequalität von vier Teilflächen (Tabelle 4) des landwirtschaftlichen Betriebes Moorhof Neukalen genauer untersucht (siehe Box 2). Es wurden Daueruntersuchungsplots eingerichtet von denen im Juli, August, September und November Biomasse-Proben entnommen wurden. Die Biomasse der Proben wurde in drei verschiedene Pflanzengruppen sortiert: „Sauergräser“, „Süßgräser“ und „Kräuter“. Die Flächen wurden so ausgesucht, dass Dominanzbestände (>80 % des Biomasseanteiles) von Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea* L.), verschiedenen Seggen (*Carex* sp. L.) und einem gemischten Feuchtgrünlandbestand (Restbestände von Kultursorten und moorassoziierten Süßgräsern) vorherrschten.

Tabelle 4: Charakterisierung der Projektflächen (fett = bestandsbildende Arten, Ertrag: Durchschnittswerte über mehrere Jahre)

Fläche	Seewiese	Knick-Links	Knick-Rechts	Fangstand
Kürzel	SW	KL	KR	FS
Koordinaten	53.822510, 12.808636	53.815118, 12.818686	53.813794, 12.816258	53.805622, 12.812421
Status	NSG Peenetal von Salem bis Jarmen	NSG Peenetal von Salem bis Jarmen	NSG Peenetal von Salem bis Jarmen	NSG Peenetal von Salem bis Jarmen
Vegetation	<i>Carex acuta</i>	<i>Phalaris arundinacea</i>	<i>Carex acuta</i>	<i>Calamagrostis canescens</i>
	<i>Carex acutiformis</i>	<i>Peucedanum palustre</i>	<i>Carex acutiformis</i>	<i>Agrostis canina</i>
	<i>Lychnis flo -cuculi</i>	<i>Equisetum palustre</i>	<i>Galium palustre</i>	<i>Filipendula ulmaria</i>
	<i>Caltha palustris</i>	<i>Lysimachia vulgaris</i>	<i>Symphytum officinale</i>	<i>Ranunculus acris</i>
Torfmächtigkeit (m)	7	6	6	5
Höhe (m über NN)	0,32	0,36	0,33	0,42
Jahresmittel Wasserstand (cm)	-20	-30	-30	-40
Durchschnittlicher Ertrag (t/ha)	3,6	5,3	4,2	6,7

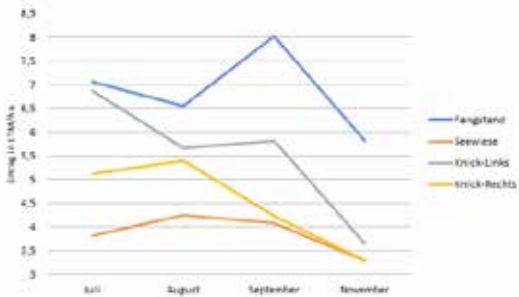


Abb. 6: Erträge der Projektflächen gemessen an den Erntemengen aus den Daueruntersuchungsplots

Neben der stofflichen Entlastung des Grund- und Oberflächenwassers durch das Abtransportieren der Biomasse und damit dem Export ihrer Inhaltsstoffe aus dem System (Box 3) bestehen drei hauptsächliche Herausforderungen bezüglich der Zusammensetzung der Biomasse bei der thermischen Verwertung von halmgutartiger Biomasse: (1) Erhöhte Emissionen, (2) Korrosion und (3) Schlackebildung.

Herausforderung 1: erhöhte Emissionen

Wie in Tabelle 1 erwähnt sind beim Verbrennen der Biomasse die beiden Stoffe Schwefel (S) und Stickstoff (N) an der Bildung von besonders schädlichen Schwefeloxid-, Stickstoffoxid-, Cyanwasserstoff- und Distickstoffmonoxidemissionen beteiligt. Die folgende Abbildung gibt einen Einblick in die veränderte Stickstoffkonzentration der einzelnen Pflanzengruppen je nach Erntezeit.

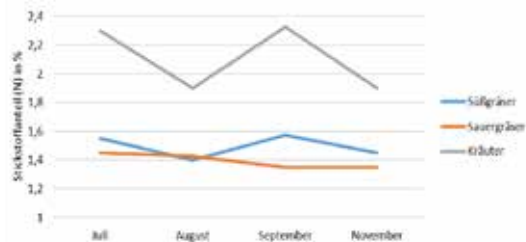


Abb. 8: Stickstoff (N) Gehalte der Biomasse von verschiedenen Pflanzengruppen je nach Erntezeit

Wie auch Tonn et al. (2010) für Landschaftspflegebiomasse von Mineralbodenstandorten bemerken, ändern sich die Gehalte von Stickstoff und Schwefel nicht signifikant mit späteren Ernteterminen. Ein Reduzieren der Gesamtmenge bei den beiden emissionsrelevanten Stoffen lässt sich somit weder durch gezielte Auswahl von Pflanzengruppen noch durch das Verschieben des Erntetermins, sondern nur durch die Steuerung über die Produktivität erreichen. In Abbildung 8 sind erhöhte Gehalte von Stickstoff (N) in der Gruppe der Kräuter zu beobachten. Wegen der geringen Mengen von Kräuterbiomasse in den Untersuchungsplots lässt sich nur eine geringe Signifikanz in den Daten für die Kräuter erkennen. Betrachtet man die Stickstoffgehalte der Biomasse der einzelnen Projektflächen, sind keine Unterschiede zu beobachten. Da Stickstoff (N) ein wichtiger Abgasbildner ist, könnte sich ein erhöhter Anteil an Kräutern in der Biomasse, die als Brennstoff genutzt wird, als nachteilig herausstellen. Da es sich bei Abbildung 8 jedoch um Anteile in Prozent handelt, und die Anteile der jeweiligen Pflanzengruppen am Gesamtgewicht der Biomasse nicht abgebildet wird, sei ergänzend erwähnt, dass der erhöhte Stickstoffgehalte von Kräuterbiomasse die Emissionswerte bei der Verbrennung vermutlich nur gering beeinflusst. Zu prüfen ist, ob hohe Anteile von Kräuterbiomasse einen signifikanten Einfluss auf die Emissionen haben.

Herausforderung 2: Korrosionsgefahr

Die Abbildungen 9 und 10 zeigen die Gehalte der verbrennungskritischen Elemente Kalium (K) und Chlor (Cl) der einzelnen Pflanzengruppen im Verlauf einer Vegetationsperiode. Hohe Konzentrationen an Kalium (K) und Chlor (Cl) bedingen Hochtemperatur-Korrosionsschäden an Kesselraum und an den Wärmetauschern. Kalium- und Chlorkonzentrationen nehmen mit späteren Erntezeiten deutlich in allen Pflanzengruppen ab

Box 3: Nährstoffzug als Ökosystemdienstleistung durch Paludikultur

Der Entzug von Nährstoffen durch die Ernte von Biomasse aus Mooren ist eine Ökosystemdienstleistung im Sinne der Definition nach Reid (2005). Die Eutrophierung von Oberflächengewässern dagegen bedroht aquatische und marine Ökosysteme beispielsweise der Ostsee stark. Nährstoffe in Form von Biomasse zu binden und anschließend zu entnehmen, spielt in Mooren eine besondere Rolle, wie u.a. in Geurts et al. (2020) dargestellt. Nutzt man die Biomasse dann zusätzlich stofflich, werden die Nährstoffe über einen langen Zeitraum festgelegt. Da nasse Moore nicht gedüngt werden, ist der abgebildete Nährstoffzug als absolute Größe zu betrachten. Die Erträge auf den Untersuchungsflächen (siehe Abbildung 7) sind über Nährstoffeinträge aus der Deposition (Niederschläge, Stäube) und über Einträge mit dem Wasser über die Jahre stabil. Somit lässt sich tatsächlich von einer Nährstoffentlastung für das gesamte System ausgehen. Unter Umständen erfolgt jedoch über die kontinuierliche Entnahme von Biomasse eine Aushagerung. Die Vegetationszusammensetzung kann sich dadurch verändern.

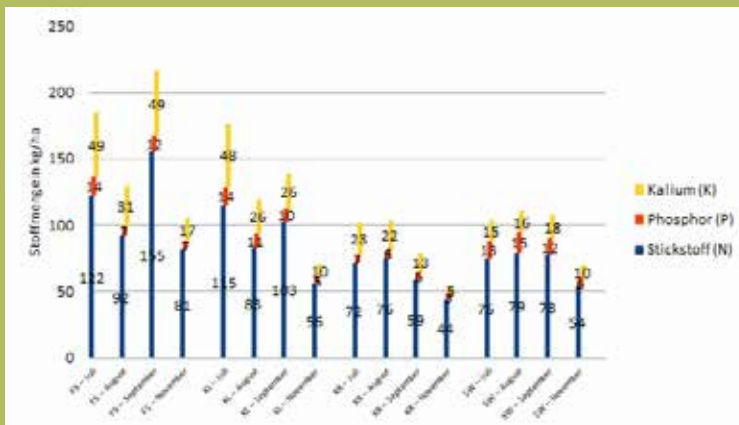


Abb. 7: Anteil der über die Ernte eingetragene Biomasse von den Projektflächen exportierte Nährstoffmenge, dargestellt nach Erntezeitpunkt. FS = Fangstand; KL = Knick-Links; KR = Knick-Rechts; SW = Seewiese

Abbildung 7 zeigt höhere Werte für Nährstoffexporte von den Flächen Fangstand (FS) und Knick-Links (KL) gegenüber den beiden Flächen Knick-Rechts (KR) und Seewiese (SW). Zu erklären ist dies mit dem generell höheren Ertrag der Flächen. Die im Projekt betrachteten Pflanzengruppen, und somit auch die pflanzliche Biodiversität einer Fläche, haben nur über deren Produktivität einen Einfluss auf die Menge der exportierten Nährstoffe (Quantität). So zeigten Süßgräser und Sauergräser keine Unterschiede in ihrer Verteilung der Nährstoffe zwischen den Gruppen (Qualität). Die schwankenden Werte für die Nährstoffgehalte in der Biomasse korrelieren nur im Falle des Kaliums (K) mit einem zusätzlichen Faktor. Kalium (K) scheint besonders in früher, frischer Biomasse in größeren Anteilen vorzukommen.

(Abbildung 9 und 10). Die Gruppe der Kräuter zeigt hierbei größere Schwankungen. Der Grund dafür liegt in der geringen Menge an Kräuterbiomasse in den Proben, die eine Messgenauigkeit erhöht und somit die Auswertung erschwert. Hochtemperaturkorrosion lässt sich nicht gänzlich verhindern. Biomasseseitig ist an dieser Stelle jedoch klar festzustellen, dass sich eine

späte Ernte positiv auf die für Korrosion verantwortlichen Inhaltsstoffe auswirkt. Obernberger et al. (2006) gibt einen Wert für Chlor (Cl) von 0,1% in der Biomasse an, ab dem eine Verbrennung als unproblematisch anzusehen ist. Letztlich ist ein korrekter Brennvorgang im Kessel (siehe Kapitel 2.2) der wichtigste Faktor, um schädliche Prozesse zu minimieren.

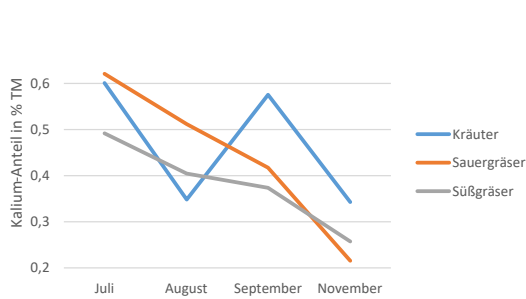


Abb. 9: Kaliumkonzentrationen der Biomasse von verschiedenen Pflanzengruppen je nach Erntezeit

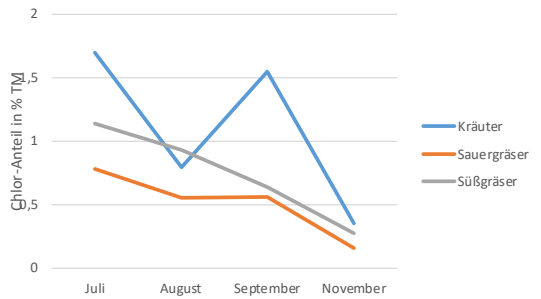


Abb. 10: Chlorkonzentrationen der Biomasse von verschiedenen Pflanzengruppen je nach Erntezeit

Herausforderung 3:**Schlackebildung/Ascheschmelzverhalten**

Nach Öhmann et al. (2004) und Steenari et al. (2009) dient die Formel „ $K/(Mg+Ca)$ “ als Indikator für das Ascheschmelzverhalten von biogenem Brennstoff in kleinen und mittleren Heizwerken. Damit kann die Wahrscheinlichkeit für Schlackebildung für die Brennstoffe abgeleitet werden. Hohe Indikatorwerte sind hierbei als negativ und niedrige Werte als positiv zu bewerten. Hohe Indikatorwerte bedeuten also eine niedrige Ascheschmelztemperatur, was zu vermehrter Schlackebildung führt. An dieser Stelle sei angemerkt, dass zusätzliche Faktoren wie z.B. das Verhältnis des Silizium-Gehalts zum Asche-Gehalt des Brennstoffes ebenfalls einen Einfluss auf das Ascheschmelzverhalten haben (Öhmann et al., 2004). Eine möglichst geringe Schlackebildung ist für den reibungslosen Ablauf des Brennvorganges essenziell. Zu viel Schlacke bedeutet eine erhöhte Störanfälligkeit, zusätzliche Arbeit und im Endeffekt höhere Kosten.

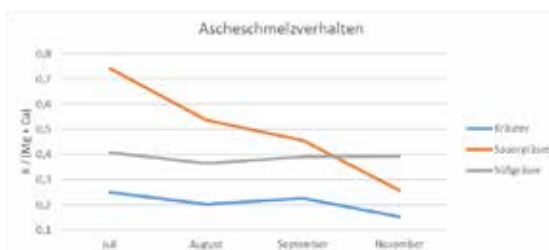


Abb. 11: Errechnete Indikatorwerte aus „ $K/(Mg+Ca)$ “ für Pflanzengruppen je nach Erntezeit

Bei dem errechneten Indikator lassen sich Unterschiede zwischen den einzelnen Pflanzengruppen feststellen (Abbildung 11). Die Kräuter besitzen den niedrigsten Indikatorwert und zeigen nur eine geringe Abnahme bei später Ernte. Dagegen weisen die Sauergräser im Juli einen hohen Indikatorwert auf, der mit späterer Ernte stark sinkt. Unterschiedliche Erntetermine wirken sich bei den Süßgräsern nicht, und bei den Kräutern nur sehr gering, auf die Indikatorwerte aus. Bei einem Vergleich der Indikatorwerte der Projektflächen (Abbildung 12) zeigt sich, dass sich eine spätere Ernte auf allen Standorten positiv auf das Ascheschmelzverhalten auswirkt. Die geringsten Werte werden allerdings in der Seewiese und der Knick-Rechts-Fläche erreicht, in denen Sauergräser dominieren. Erwähnenswert ist, dass regelmäßige Überschwemmungsereignisse über den angrenzenden Peene-Kanal die Seewiese (SW) im Unterschied zu Knick-Rechts (KR) beeinflussen. Eine in den Messwerten feststellbare Erhöhung der Kaliumwerte in der Biomasse im September lässt sich durch den Eintrag von Kalium (K) über belastetes Wasser erklären.

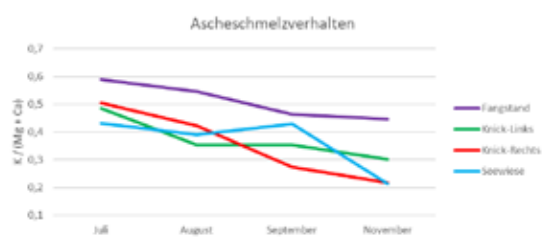


Abb. 12: Errechnete Indikatorwerte aus „ $K/(Mg+Ca)$ “ der verschiedenen Projektflächen je nach Erntezeit

2.1.4 Lösungen und Empfehlungen

Aus den im vorigen Abschnitt präsentierten Ergebnissen lassen sich einige Empfehlungen zum Flächenmanagement, der Ernte und zum Umgang mit der Biomasse ableiten. Wie aber so oft können landwirtschaftliche Praxis und Theorie zu idealen Bewirtschaftungskonzepten weit auseinanderliegen. Die Bewirtschaftung von Mooren sollte in jedem Fall zuallererst dem Vermeiden von flächenbedingten Emissionen dienen. Sind die Zielwasserstände erreicht, lassen sich bestimmte Pflanzengemeinschaften aus Moorpflanzen nicht immer aufrechterhalten. Oft erlauben Pegelschwankungen von lokalen Oberflächengewässern oder das saisonal bedingte Ansteigen von Wasserständen eine Verschiebung der Ernte später ins Jahr nicht. Dennoch sind hier praxisnahe Empfehlungen für das Flächenmanagement im Projektgebiet zu formulieren:

Eine möglichst späte Ernte hat einen positiven Einfluss auf das Ascheschmelzverhalten des von einer Fläche geernteten Brennstoffes. Besonders signifikant ist dieser Effekt bei Sauergräsern zu beobachten. Tonn et al. (2012) wiesen auf einen Auswaschungseffekt hin, durch den Kalium- und Chlorkonzentrationen durch Beregnung der Biomasse vermindert werden können. Süßgräser als Brennstoff hingegen verbessern mit späteren Ernteterminen das Ascheschmelzverhalten nur geringfügig. Hieraus lässt sich Folgendes zur gestaffelten Ernte von Flächen mit verschiedenen Dominanzbeständen empfehlen: Flächen auf denen viele Sauergräser vorkommen, sollten unbedingt zuletzt in der Ernteplanung aufgeführt und am idealsten zu Mitte bis Ende September beerntet werden. Zu prüfen ist der Effekt einer zweischürigen Mahd auf die Brennstoffqualität.

**Für Brennstoff on Mooren gilt:
Frühe Ernte \leq späte Ernte**

Artenreiche Flächen mit vielen Kräutern sind auf Grund des günstigen Verhältnisses zwischen den Kalium-, Chlor-, Calcium- und Magnesiumgehalten in Kräutern prinzipiell gut als Brennstoff geeignet. Folglich ist es positiv für den Heizwerksbetrieb, Biomasse von Flächen zu verwenden, die dem Erhalt der Biodiversität dienen und nicht dem Anbau von Monokulturen, zumindest was die Faktoren Korrosion und Schlackebildung angeht. Der Wasserstand auf der Fläche beeinflusst die Zusammensetzung der Vegetation stark. Bei den vier untersuchten Projektflächen ist die trockenste Fläche (Fangstand) zwar die ertragreichste, jedoch auch die mit dem schlechtesten Indikatorwert für das Ascheschmelzverhalten. Die Fläche wird von diversen Feuchtwiesen-Arten dominiert. Rohrglanzgras, welches auf der Knick-Links Fläche dominiert, zeigt bereits günstigere Werte bei verbrennungskritischen Inhaltsstoffen, obwohl die Art keine dauerhaften Wasserstände in oder über Flur toleriert. Im Vergleich mit Messwerten von Mineralbodenstandorten für alle in diesem Kapitel genannten Inhaltsstoffe scheinen Moorflächen eine ähnliche bis etwas günstigere Komposition aufzuweisen. Paludikultur-Biomasse eignet sich daher gut für die thermische Verwertung.

Für Brennstoff on Mooren gilt:
Monokultur Süßgräser ≤ Monokultur Sauergräser ≤ pflanzliche Biodiversität

Ein hoher Wasserstand und besondere Ereignisse wie beispielsweise Überschwemmungen sollten in bestimmten Fällen mit in die Ernteplanung einbezogen werden. Der Eintrag von Kalium (K) durch Oberflächengewässer kann einen deutlichen Einfluss auf die Brennstoffqualität ausüben. Dürreperioden verhindern ein Auswaschen von Kalium (K) und Chlor (Cl), wodurch ebenfalls ein negativer Effekt auf die Brennstoffqualität erzielt wird. Generell hohe Wasserstände scheinen einen positiven Einfluss auf das Brennverhalten der Biomasse zu haben. Gleichzeitig maximiert man mit viel Wasser in der Fläche den positiven Klimaeffekt.

Für Brennstoff on Mooren gilt:
Entwässerte Moore ≤ Feuchtwiesen ≤ Nasswiesen

2.2 Thermische Verwertung – Paludikultur-Biomasse effektiv verbrennen

Im Folgenden wird zunächst auf die Grundlagen der Biomasseverbrennung, der Feuerungstechniken und der Schadstoffbildung eingegangen. Anschließend werden Ergebnisse aus den Brennstoffanalysen dargestellt und Ergebnisse von Untersuchungen zur Nutzung von Biomassebrennstoffen aus der Nasswiesenbewirtschaftung

in dem kommerziellen Pilot-Heizwerk mit 800 kW Feuerungsanlage im Vergleich zu Ergebnissen aus Verbrennungsversuchen in einer 15 kW Kleinfeuerungsanlage vorgestellt. Empfehlungen aus verbrennungstechnischer Sicht runden dieses Kapitel ab.

2.2.1. Grundlagen und Stand der Technik

Charakteristik von Biomassebrennstoffen

Die Zusammensetzung der Biomasse lässt sich sowohl durch Ihre Elementarzusammensetzung als auch durch eine Unterteilung in brennbare und nichtbrennbare Substanz unterscheiden. Dabei sind folgende Komponenten zu nennen:

- *Nicht brennbare Bestandteile* sind Asche und Wasser (H_2O),
- *brennbare Bestandteile* sind in erster Linie Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H), daneben auch (unerwünschter) Schwefel (S), weitere Bestandteile sind Komponenten wie Sauerstoff (O_2), Stickstoff (N) etc.

Verbrennungsreaktion

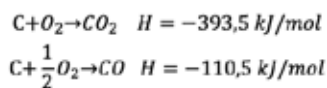
Ein realer Verbrennungsprozess findet statt, weil viele unterschiedliche Elementarreaktionen ablaufen. Im allgemeinen Sprachgebrauch versteht man unter Verbrennung die Oxidation eines brennbaren Materials mit Sauerstoff unter Flammenbildung als „Feuer“ (Abbildung 13). Verbrennungsreaktionen sind exotherme Reaktionen und setzen thermische Energie frei, die sich als Nutzwärme oder in Heizkraftwerken auch zum Erzeugen von Strom und Wärme nutzen lässt.



Abb. 13: Verbrennungsreaktion (HTW Berlin)

Vollständige und vollkommene Verbrennung

Ziel einer umweltfreundlichen Verbrennung ist es, die maximale thermische Energie freizusetzen und bei der Verbrennung freigesetzten Schadstoffemissionen zu minimieren. Laufen die Reaktionen vollständig ab, und kommt es damit zu einer vollständigen Oxidation sämtlicher oxidierbarer organischer Bestandteile des Brennstoffs, spricht man von vollständiger Verbrennung, d. h. jeglicher im Brennstoff enthaltener Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H) wird oxidiert. Dies sagt allerdings nicht aus, ob alle brennbaren Bestandteile zur höchsten Oxidationsstufe überführt und damit die maximale Energiefreisetzung erreicht wird (z.B. ob aller Kohlenstoff (C) zu Kohlendioxid (CO₂) und aller Wasserstoff (H) zu Wasser (H₂O) aufoxidiert wird). Die Reaktion von Kohlenstoff (C) zu Kohlenmonoxid (CO) ist z.B. unvollständig und setzt neben Kohlenmonoxid (CO) als Schadstoff auch nur eine reduzierte Energiemenge frei.



Bei einer vollständigen und vollkommenen Verbrennung oxidiert aller Kohlenstoff (C) und aller Wasserstoff (H) in Gegenwart von Sauerstoff (O) unter Energiefreisetzung zu Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Wasser (H₂O). Dies ist die Grundvoraussetzung für eine umweltfreundliche Verbrennung. Die Luftüberschusszahl (λ), d.h. das Verhältnis der Luftmenge, die dem Prozess tatsächlich zugeführt wird zur theoretisch erforderlichen Luftmenge (m_{Luft}), muss dabei immer gleich oder größer als eins sein.

$$\lambda = \frac{m_{\text{Luft,tat}}}{m_{\text{Luft,min}}}$$

Das stellt sicher, dass für alle brennbaren Bestandteile hinreichend Sauerstoff (O) zur Verfügung steht. Tatsächlich liegt λ bei den üblichen Feststofffeuerungen im Bereich zwischen 1,4 und 2,5, d.h. die Verbrennung erfolgt bei Luftüberschuss.

Phasen der Feststoffverbrennung

Die Umwandlung der in der Biomasse chemisch gebundenen Energie in thermische Energie ist ein komplexer Prozess und erfolgt über eine Vielzahl (weitgehend unbekannter) Elementarreaktionen. Eine vereinfachende Beschreibung des Prozesses zeigt Abbildung 14.

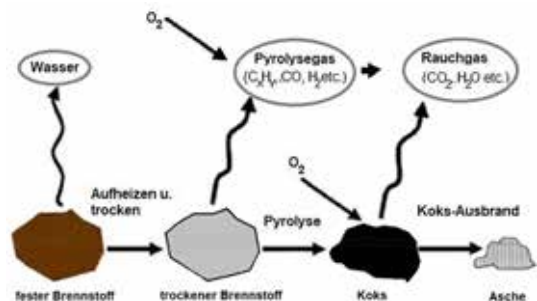


Abb. 14: Phasen der Feststoffverbrennung (HTW Berlin)

Unterteilt wird der Verbrennungsprozess dabei in:

1. Aufheizen des Brennstoffpartikels (Strahlung zur Partikeloberfläche und Wärmeleitung ins Partikelinnere),
2. Thermische Zersetzung des Brennstoffpartikels (Produktion der flüchtigen Gase und des Kokes, Verbrauch thermischer Energie für endotherme Zersetzungsprozesse),
3. Diffusion der gasförmigen Produkte (Flüchtige) zur Partikeloberfläche und in die Umgebung des Partikels,

4. Zündung und Verbrennung der Flüchtigen mit der umgebenden Verbrennungsluft, Abtransport der Reaktionsprodukte,
5. Diffusion von Sauerstoff zur Partikeloberfläche und ins Innere des Partikels,
- 6a. Verbrennung (Oxidation) des festen Kokes mit Sauerstoff und Abtransport der Reaktionsprodukte,
- 6b. Sekundärreaktionen zwischen Koks und Reaktionsprodukten (CO, CO₂)

Bereits im Vorfeld einer Anlagenkonzipierung erfolgt die Auswahl der Feuerung (Abbildung 15) in Abhängigkeit vom Brennstoff, seinen Eigenschaften und seiner Lieferform.

Tabelle 5 zeigt eine vergleichende Betrachtung verschiedener Feuerungssysteme für Biomassebrennstoffe in Abhängigkeit von Anlagegröße und Form der Biomasse (FNR 2014).

Feuerungsarten und deren Charakteristika

Der Feuerungstechnik kommt die Aufgabe zu, die im Brennstoff chemisch gebundene Energie in thermische Energie zu wandeln und dabei der Grundsatzanforderung an eine umweltfreundliche Verbrennung gerecht zu werden. Die Auswahl eines geeigneten Verbrennungs-/Feuerungssystems hängt dabei davon ab,

- welche Beschaffenheit (z.B. Form, Größe) die zu nutzenden Brennstoffe haben und
- welche Anlagenleistung (Kleinanlagen wie häusliche Feuerungen, Großanlagen im Kraftwerksbereich) erforderlich ist.

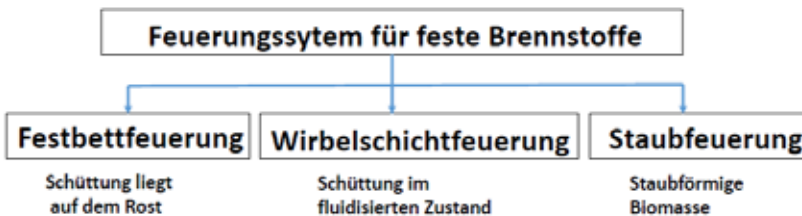


Abb. 15: Unterteilung der verschiedenen Feuerungsarten

Tabelle 5: Abhängigkeit Feuerungsarten von Beschickung, Brennstoffe, m = mechanisch, p = pneumatisch (FNR, 2014)

Feuerungsart	Beschickung	Brennstoff	Leistungsbereich	Wassergehalt (% FM)
Holzfeuerungen				
Vorofenfeuerung mit Rost	m	Hackschnitzel, Aschegehalt bis 5%	35 kW–1,5 MW	5–30
Unterschubfeuerung	m	Pellets, Späne Aschegehalt bis 1,5%	10 kW–2,5 MW	5–30
Vorschubrostfeuerung	m	alle Holzbrennstoffe, Aschegehalt bis 50%	150 kW–50 MW	5–60
Wanderrostfeuerung	m	alle Holzbrennstoffe, Aschegehalt bis 50%	1 MW–20 MW	5–60
Stationäre Wirbelschichtfeuerung	m	Partikeldurchmesser <90 mm	5 MW–35 MW	5–60
Zirkulierende Wirbelschichtfeuerung	m	Partikeldurchmesser <40 mm	15 MW–250 MW	5–60
Einblasfeuerung	pm	Partikeldurchmesser <5 mm	500 kW–50 MW	meist <20
Halmgutfeuerungen				
Ballenfeuerung mit stirnseitigem Abbrand („Zigarrenfeuerung“)	m	Halmgutballen	>3 MW	<20
Ballenfeuerung mit Ballenteiler	m	Halmgutquaderballen	0,5 MW–3 MW	<20
Ballenfeuerung mit Ballenauflöser	m	Halmgutquaderballen	>0,5 MW	<20
Halmguttaugliche Schüttgutfeuerungen — Schubbodenfeuerung — Vorschubrostfeuerung	m	Häckselgut, Pellets, Quaderballen	0,05 MW–3 MW 2,5 MW–>20 MW	<20

Bei der untersuchten Anlage handelt es sich um eine halmguttaugliche Vorschubrostfeuerung mit einer Ballenzuführung mit Ballenauflöser. Auf dem Rost erfolgen die Trocknung und die Vergasung der Biomasse und am Ende des Rosts wird der Restkoks ausgebrannt. Übrig bleiben die Aschen, die mittels einer Schnecke automatisch in einen Container ausgetragen werden.

Allgemein lässt sich festhalten, dass Vorschubsteuerungssysteme positive aber auch negative Eigenschaften haben können und somit folgende Merkmale aufweisen:

Positiv:

- Niedrige Anlageninvestitionskosten,
- niedrige Betriebskosten,
- niedrige Staubbelastung im Rauchgas,
- hohe Flexibilität bezüglich des Einsatzes von unterschiedlichen Brennstoffen,
- hohe Brennstofftoleranzen, da Primär- und Sekundärluft durch den Rost bzw. über dem Brennstoffbett zugegeben werden.

Negativ:

- Effiziente NO_x-Reduktion erfordert spezielle Technologie,
- höherer O₂-Überschuß, der den Wirkungsgrad verringert,
- nicht immer optimale gleichmäßige Verbrennungsbedingungen durch Wanderrost
- aufwendiger wegen der bewegten Teile (Verschleißteile).

Gesetzliche Rahmenbedingungen zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte

Das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) regelt, welche Anforderungen Feuerungsanlagen in Abhängigkeit von der Brennstoffkategorie und der Feuerungswärmeleistung erfüllen müssen. Die Maßnahmen zur Luftreinhaltung betreffen dabei im Wesentlichen Anforderungen an die einzusetzenden Brennstoffe, die Feuerungstechnik, die Abgasreinigung und an die Emissionsüberwachung. Die einzuhaltenden Emissionsgrenzwerte für Holz und Stroh sowie ähnliche Stoffe sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Emissionsgrenzwerte BImSchV/ TA-Luft für Biomassebrennstoffe (FNR 2014)

	Anlagenleistung	Genehmigungsverfahren	Altholzkategorie	Relevante Vorschrift	O ₂ -Bezugswert %	Emissionsgrenzwerte							
						Staub	CO	Ges.-C	NO _x	SO ₂	HF	HCL	Dioxine/Furane
						mg/Nm ³							ng/Nm ³
Stroh oder ähnliche pflanzliche Stoffe	FWL ₄ bis < 100 kW	nicht genehmigungspflichtig	-	1. BImSchV	13	20	400	-	-	-	-	-	-
	FWL 0,1–50 MW FWL 0,1 bis < 1 MW FWL 1 bis < 50 MW	vereinf. Verf. (§ 19 BImSchG)	-	TA Luft	11	50 20	250	50	500 400	350	-	30	0,1
	FWL ≥ 50 MW	förm. Verf. (§ 10 BImSchG)	-	13. BImSchV	6	20	150	-	250	200	-	-	0,1

FWL: Feuerungswärmeleistung, NWL: Nennwärmeleistung

Brennstofftechnischen Eigenschaften

Anhand der brennstofftechnischen Eigenschaften kann die Eignung eines Brennstoffes für den Einsatz in Feuerungssystemen und Anlagen beurteilt werden. Zu den wichtigsten Kriterien/Eigenschaften zählen die elementare Zusammensetzung des Brennstoffes, der Gehalt an

Wasser, flüchtigen Substanzen, fixem Kohlenstoff (C), Asche sowie der Brenn- und Heizwert und das Ascheschmelzverhalten. Abbildung 16 zeigt die für die Bestimmung der Eigenschaften entsprechenden DIN EN ISO Normen.

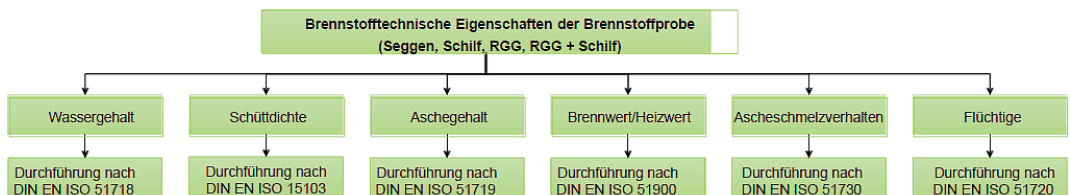


Abb.16: Aufteilung der brennstofftechnischen Eigenschaften und deren Durchführungsvorschriften nach DIN

2.2.3 Verbrennungstechnische Untersuchungen

Praxisbeispiel am Heizwerk Malchin

Die Möglichkeit, die aus Niedermoorflächen gewonnene halmgutartige Biomassen (hier Schilf, Rohrglanzgras und Seggen) zu nutzen, wird im Biomasseheizwerk der Firma Agrotherm GmbH in Malchin im technischen Maßstab untersucht. Durch die Installation eines Biomasseheizkessels (Abbildung 17) der Firma LIN-KA/Danstoker mit einer Feuerungsleistung von 800 kW im bestehenden Erdgas-Heizwerk wurde im Jahr 2014 die Möglichkeit geschaffen, Halmgüter energetisch zu nutzen und die bereitgestellte thermische Energie über das bestehende Nahwärmenetz zur Versorgung von 543 Wohneinheiten, 2 Schulen, einer Kita und von Büroeinheiten mit nachhaltiger Wärme aus erneuerbaren Energieträgern einzusetzen (Bork 2019). Die Anlage wird im Leistungsbereich zwischen 600 – 700 kW (ca. 80% der Nennleistung) betrieben.

Die aus der Verbrennung der Biomasse bereitgestellte Wärme dient zur Abdeckung von Grund- und Mittelast am Standort. Als Brennstoff für den Biomassekessel kann neben der im Bereich des Kummerower Sees erzeugten Niedermoorbiomasse auch Stroh bzw. Holz in Form von Pellets oder Holzhackschnitzeln eingesetzt werden.

In der Heizperiode 2019 sind insgesamt 4.200 Ballen Niedermoorbiomasse verbraucht und 3.370 MWh Wärmeenergie produziert worden. Dies entspricht einer jährlichen Einsparung von ca. 3.000 t fossilem Kohlendioxid (CO₂) durch den Ersatz fossiler Energieträger.



Abb. 17: Anlage im Biomasseheizwerk Malchin
(Quelle: Agrotherm GmbH, 2019)

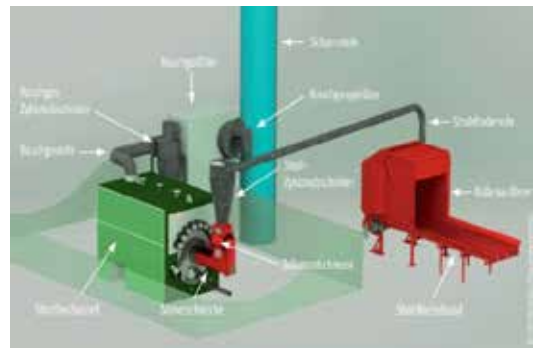


Abb. 18: Prinzip des Aufbaus des Heizwerks Malchin
(Quelle: Agrotherm GmbH, 2019)

Charakterisierung von Niedermoorbiomasse als Brennstoff

In den Verbrennungsversuchen im Heizwerk Malchin wurden Biomassen eingesetzt, die im Sommer und Spätsommer des Jahres 2019 im Bereich der wiedervernässten Moorwiesen bei Neukalen nordöstlich von Malchin geerntet worden waren (Abbildung 19).

Die Ergebnisse der durchgeführten Analysen der Biomasse-Brennstoffe sind in Tabelle 4 dargestellt. Auffällig ist, dass der Aschegehalt bei den untersuchten Halmgütern deutlich höher als bei Holz liegt (vergleiche Tabelle 7).



Abb. 19 Nasswiesenbestände in den Moorwiesen bei Neukalen mit Schilfröhricht (links) und Rohrglanzgrasbestand (rechts) (Fotos: M. Barz)

Tabelle 7: Brennstofftechnische Eigenschaften der Brennstoffproben (Seggen, Schilf, RGG, RGG + Schilf).

RGG = Rohrglanzgras. Ergebnisse aus den Labormessungen

Parameter	Seggen	Schilf	RGG	RGG+Schilf
Wassergehalt (%)	6,0	4,8	4,9	4,6
Schüttdichte (kg/m ³)	605,0	632,2	619,8	587,3
Aschegehalt (%)	6,8	4,5	5,0	6,1
Brennwert/Heizwert (MJ/kg)	18,1	17,4	17,6	17,5
Ascheschmelzverhalten (°C)	1130	1190	1173	k.A.
Flüchtige Stoffe (%)	74,0	76,7	74,7	74,5

Ein weiteres wichtiges Kriterium zur Beurteilung der halmgutartigen Brennstoffe bezüglich ihrer Auswirkungen auf den Verbrennungsprozess (wie z.B. Materialkorrosion von Anlagenteilen und Ablagerungen an Wärmeüberträgern) ist der Gehalt an verbrennungskritischen Komponenten wie Schwefel (S) und Chlor (Cl) im Brennstoff (Oehmke et al. 2016; siehe Kapitel 2.1.3). Tabelle 8 zeigt die Chlor- und Schwefelgehalte der Biomasse aus dem Projektgebiet.

Tabelle 8: Kritische Inhaltsstoffe: Chlor- und Schwefelgehalte der untersuchten Biomasse, Durchführung nach DIN EN ISO 16994

Parameter	Seggen	Schilf	RGG	RGG+Schilf
Chlor (%)	0,22	0,04	0,15	0,21
Schwefel (%)	0,06	0,045	0,075	0,08

Messkampagnen

Untersuchungen zur Verbrennung von Biomassen aus Nasswiesen wurden sowohl mit pelletierter Biomasse als auch mit losem Halmgut (aufgelöste Ballen mit Seggen, Rohrglanzgras und Stroh) durchgeführt (siehe Abbildung 20).



Abb. 20: Bestückung des Förderbands mit Niedermoorbiomasse-Rundballen (Foto: G. Kabengele)

Untersucht wurden die Auswirkungen verschiedener Parameter (Kesselleistung, Brennraumtemperaturen, Luftzahlen sowie Primär-/Sekundärluftverhältnisse) auf die Emissionswerte sowie auf mögliche Auswirkungen auf den Verbrennungsprozess durch Einbauten in der Brennkammer. Abgasproben zur Analyse der Emissionswerte wurden dem Rauchgasstrom unmittelbar nach dem Verlassen der Brennkammer vor dem Rauchgasfilter (Abbildung 21a) sowie an einer weiteren Probeentnahmestelle unmittelbar vor dem Rauchgaskamin (Abbildung 21b) entnommen.



Abb. 21a: Probeentnahmestelle vor Staubfilter (Foto: G. Kabengele)



Abb. 21b: Probeentnahmestelle vor Rauchgaskamin (Foto: G. Kabengele)

Die 800 kW Feuerungsanlage in Malchin fällt aufgrund des Einsatzes halmgutartiger Brennstoffe unter den Geltungsbereich der TA Luft, hier Absatz 5.4.1.2.4a (Anlagen zur Erzeugung von Strom, Dampf, Warmwasser, Prozesswärme oder erhitztem Abgas in Feuerungsanlagen durch den Einsatz anderer als in Nummer 1.2.1 oder 1.2.3 genannter fester Brennstoffe). Die gemessenen Emissionswerte sind gemäß der in Tabelle 2 dargestellten Regelungen auf einen Bezugssauerstoff von 11 % umzurechnen und mit den vorgegebenen Emissionsgrenzwerten abzugleichen. Bei den eingesetzten Biomassepellets handelt es sich um Mischpellets, bestehend aus Schilf, Seggen und Rohrglanzgras. Die Pellets weisen eine weitgehend einheitliche Form (\varnothing 8 mm, L 10 – 20 mm, siehe Abbildung 11) auf und zeichnen sich durch eine hohe Schütt- und Energiedichte (ca. 610 kg/m^3 , $18,5 \text{ MJ/kg}$) aus. Der Wassergehalt betrug 6,5%, wodurch eine problemlose Lagerung über lange Zeiträume möglich ist.



Abb. 22: Pellets aus Niedermoorbiomasse (Foto: T. Dahms)

Die Ergebnisse der Verbrennungsversuche mit Halmgutpellets sind in Abbildung 23 exemplarisch über einen Messzeitraum von 30 Minuten dargestellt.

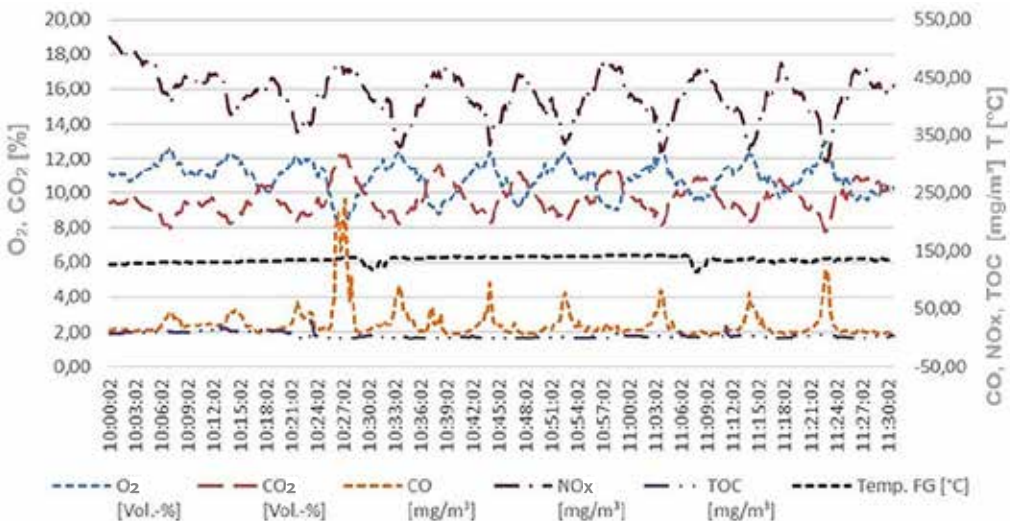


Abb. 23: Emissionswerte bei der Verbrennung von Halmgutpellets im Heizwerk Malchin bei 800 kW Nennleistung (Werte aus der Messkampagne im Februar 2019)

Die zyklischen Schwankungen der Emissionswerte sind auf die diskontinuierliche Beschickung der Anlage mit Brennstoff (der Eintrag erfolgt zyklisch im Takt von etwa drei Minuten) zurückzuführen. Trotz der dargestellten Schwankungen verläuft die Verbrennung stabil und die in Tabelle 6 dargestellten Grenzwerte werden sicher unterschritten. Da aus ökonomischen Gründen (Kosten der Pelletierung) ein dauerhafter Betrieb der Anlage mit Pellets aus Niedermoorbiomasse nicht tragbar ist (siehe Box 4), wurden weitere Messungen mit in Ballenform bereitgestellter Biomasse durchgeführt. Die verwendeten Rundballen haben die Abmessung von 100 cm × 125 cm und ein Gewicht

von durchschnittlich 220 kg/Ballen. Aufgrund widriger Wetterbedingungen zum Erntezeitpunkt betrug der Wassergehalt der in den Ballen bereitgestellten Biomasse ca. 20 %. Der Heizwert reduziert sich dadurch auf ca. 14,3 MJ/kg. In Abbildung 28 ist die Verbrennung von Seggen-Ballen dargestellt. Die Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Emissionswerte zeigt, dass sich stabile Verbrennungsverhältnisse erst ca. fünf Minuten nach Beginn der Messreihe einstellen. Nach Erreichen eines stabilen Betriebes sind auch hier die, auf die zyklische diskontinuierliche Beschickung der Feuerungsanlage zurückzuführenden, typischen Schwankungen der Emissionswerte erkennbar.

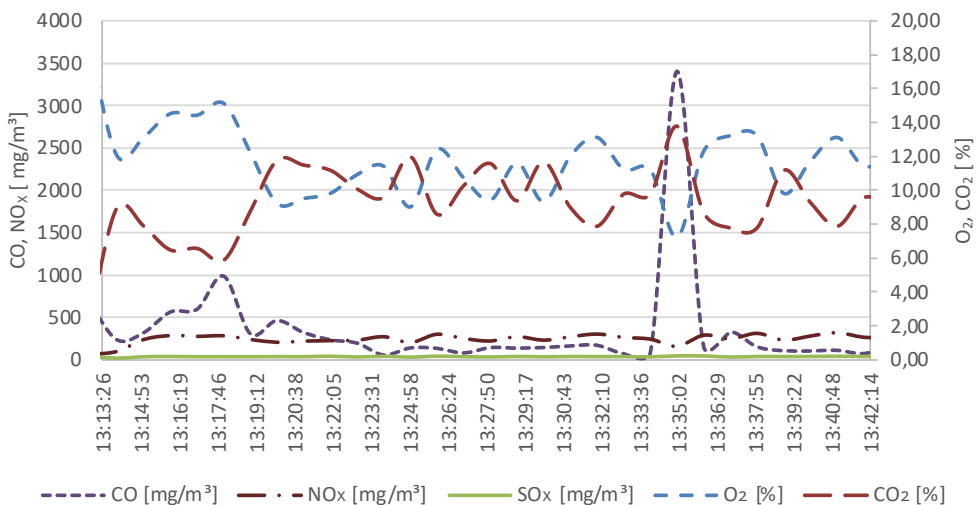


Abb. 24: Emissionswerte bei der Verbrennung von Seggen im Heizwerk Malchin bei 800 kW Nennleistung aus Verbrennungsversuchen am Heizwerk Malchin, 02/ 2020 (Seggen-Ballen) Werte aus der Messkampagne im Februar 2020

Die Werte für Stickoxide (NO_x) liegen auch bei diesem Versuch deutlich unter den in Tabelle 6 angegebenen Grenzwerten. Für Kohlenmonoxid (CO) pegeln sich die Werte nach Erreichen eines stabilen Anlagenbetriebes zunächst auf Werte unterhalb des in der TA Luft vorgegebenen Grenzwertes von 0,25 g/m³ ein. Allerdings ist nach ca. 20 Minuten Verbrennungsbetrieb ein deutlicher Peak der Kohlenmonoxidwerte, verbunden mit einem Einbruch der Luftzahl (Rückgang des Sauerstoffgehaltes im Abgas auf < 8%) erkennbar. Ursachen

hierfür sind Schwankungen durch die Beschickungseinrichtungen in die Brennkammer eingebrachte Brennstoffmenge sowie mögliche Inhomogenitäten des Brennstoffes, z.B. ein erhöhter Feinpartikelgehalt. Dieser wiederum hängt davon ab, wie gut der Ballenauflöser die Biomasse zerkleinern kann. Ein direkter Vergleich der untersuchten Nasswiesenbiomassen zeigt, dass die in der TA Luft vorgegebenen Grenzwerte eingehalten und ein bestimmungsgemäßer Betrieb der Feuerungsanlage sichergestellt werden kann (siehe Tabellen 6 und 9).

Tabelle 9: CO- und NO_x-Messwerte für Nasswiesenbiomasse und Grenzwerte nach TA Luft

Komponente	Seggen (Frühernte)	Seggen (Späternte)	RGG (Späternte)	Grenzwerte TA Luft
CO (mg/m ³)	193,9	135,3	127	250
NO _x (mg/m ³)	144,8	198,8	192	500

Kleintechnische Verbrennungsversuche

Ergänzend zu den Untersuchungen in Malchin wurden im Technikum der HTW Berlin kleintechnische Verbrennungsversuche in einer Laboranlage und einer weiteren Feuerungsanlage mit 15 kW Feuerungsleistung durchgeführt (Abbildung 25).

Zum einen lassen sich in einem Technikum leichter verschiedene Biomassen aus Paludikultur kombinieren, um eine Optimierung des Verbrennungsprozesses zu erzielen. Zum anderen ist interessant, zu überprüfen, inwieweit die Emissionsgrenzwerte für die Verbrennung von biogenen Festbrennstoffen aus Paludikultur auch nach 1. BImSchV (≥4 – <100 kW) eingehalten werden können, wie bei der TA Luft (0,1 – <1MW). Die Untersuchungen im Technikum dienen auch dazu, die erzielten Ergebnisse auf Übertragbarkeit zu prüfen.



Abb. 25: Kleinf Feuerungsanlage an der HTW Berlin (Fotos: G. Kabengele)

Im Labor der Hochschule für Technik Berlin ist eine Heizpelletanlage der Firma BRÖTJE installiert. Die Versuche erfolgten mit dem Modell „NovoPellet SPK14B“ (siehe Abbildung 25). Es handelt sich bei der Anlage um eine automatisiert beschickte Anlage mit einer sogenannten „Abwurfheizung“. Die Entaschung funktioniert über den Kippmechanismus des Rostes.

Für die Bewertung der Eignung zur Halmgutverbrennung werden die in der 1. BImSchV für kleine Feuerungsanlagen unter 100kW definierten Grenzwerte herangezogen (siehe Tabelle 2).

Folgende Biomassepellets wurden untersucht (siehe Abbildung 27):

- Holz (nach DIN Plus Norm) (als Vergleich),
- Schilf,
- Rohrglanzgras („RGG“) und
- Schilf/Rohrglanzgras 50–50% Mischung (als „Mix“ in der folgenden Abbildung abgekürzt).

Es wurden zwei Versuchsmessungen pro Biomasseart vorgenommen, was mit den Zahlen 1 und 2 verdeutlicht werden soll.



Abb. 26: Untersuchte Pelletproben für Verbrennungsversuche in der Kleinf Feuerungsanlage

Die in Abbildung 27 dargestellten Mittelwerte einer 30-minütigen Emissionsmessung zeigen, dass die in der 1. BlmSchV vorgegebenen Grenzwerte für Kohlenmonoxid (CO) von $0,4 \text{ g/m}^3$ CO sicher eingehalten werden können.

Eine Begrenzung der Stickstoffoxidwerte ist in der 1. BlmSchV nicht vorgegeben. Jedoch zeigt die Darstellung in Abbildung 28, dass selbst die in der TA Luft für Anlagen $> 100 \text{ kW}$ in Höhe von $0,5 \text{ g NOx/m}^3$ vorgegebenen Grenzwerte eingehalten werden können.

Die Schwefeldioxidkonzentrationen (in der 1. BlmSchV ebenfalls nicht reglementiert) fallen bei den Paludi-Pellets mit $0,35 \text{ g/m}^3$ (TA-Luft) höher aus als bei den zum Vergleich verwendeten Holzpellets. Ursache ist ein im Vergleich zu Holz leicht höherer Schwefelgehalt im Brennstoff (Abbildung 29).

Deutliche Unterschiede wurden bei der Beschaffenheit der Verbrennungsrückstände festgestellt (siehe Abb. 30 a–b). Während beim Einsatz reiner Schilfpellets eine sehr feine und brüchige bzw. pulverförmige weiße Struktur der Asche von einem guten Ausbrand ohne Verschlackungstendenz zeugt, wurden beim Rückstand der Mischpellets aus Seggen und Rohrglanzgras erste Sinterungserscheinungen festgestellt.

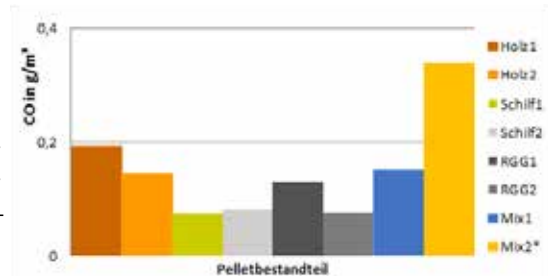


Abb. 27: Gemittelte Kohlenstoffmonoxidemissionen der Messreihen mit Biomassepellets aus Holz, Schilf, Rohrglanzgras (RGG) und Schilf-Rohrglanzgras-Mischung (Mix) mit zwei Wiederholungen (1 und 2) in der Kleinf Feuerungsanlage B (auf 13% Bezugssauerstoff gerechnet)

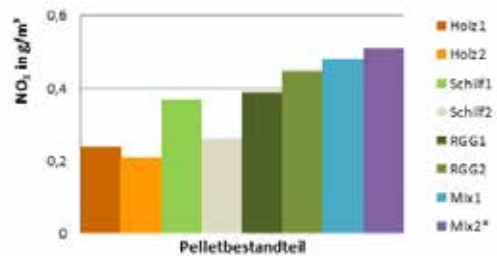


Abb. 28: Gemittelte Stickstoffoxidemissionen der Messreihen mit Biomassepellets aus Holz, Schilf, Rohrglanzgras (RGG) und Schilf-Rohrglanzgras-Mischung (Mix) mit zwei Wiederholungen (1 und 2) in der Kleinf Feuerungsanlage (auf 13% Bezugssauerstoff gerechnet)

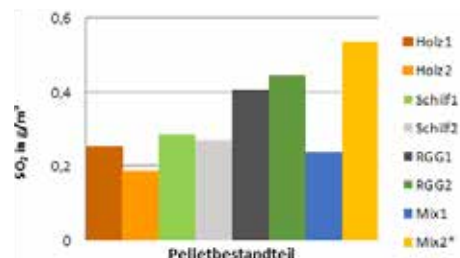


Abb. 29: Gemittelte Schwefeldioxidemissionen der Messreihen mit Biomassepellets aus Holz, Schilf, Rohrglanzgras (RGG) und Schilf-Rohrglanzgras-Mischung (Mix) mit zwei Wiederholungen (1 und 2) in der Kleinf Feuerungsanlage (auf 13% Bezugssauerstoff gerechnet)

Abschließend lässt sich feststellen, dass der Einsatz von Paludi-Pellets in Kleinf Feuerungsanlagen ohne entsprechende Anpassungen und konstruktive Änderungen durch den Kesselhersteller nur bedingt geeignet ist.

Zwar stellt die Einhaltung der in der 1. BImSchV vorgegebenen Emissionsgrenzwerte augenscheinlich kein Problem dar, allerdings führt der hohe Aschegehalt der Halmgutpellets im Zusammenwirken mit der einsetzenden Versinterung/Verschlackung zu Problemen beim Ascheaustrag. Auch die abweichende Größe der Halmgutpellets war mit Problemen bei der Beschickung der Feuerungsanlage (Blockierungen der Förderschnecke) verbunden.

Auf dem Markt gibt es mittlerweile auch Pelletfeuerungsanlagen, die mit verschiedenen Biomassen betrieben werden können. Dies ist durch eine flexible Betriebsparametereinstellung, wie Anpassung des Lambda-Wertes, der Förderschneckengeschwindigkeit oder einer gestuften Verbrennung möglich. Damit wäre der Einsatz von Halmgutpellets in Kleinf Feuerungsanlagen umsetzbar.



Abb. 30a: Verbrennungsrückstand Mixpellets

Abb. 30b: Asche der Schilfpellets (Fotos: G. Kabengele)

2.2.4 Empfehlungen aus den Verbrennungsuntersuchungen

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass die Feuerungsanlage in Malchin sehr gut für den Einsatz von Niedermoorbiomasse geeignet ist. Die Verbrennung von pelletierter Niedermoorbiomasse zeichnet sich durch stabile Emissionswerte aus. Aufgrund der hohen volumenbezogenen Energiedichte der Pellets ist sogar eine erhöhte Energiefreisetzung in der Kesselanlage möglich. Aus ökonomischen Gründen, wie z.B. hohe Brennstoff- und damit Energiebereitstellungskosten beim Einsatz von Pellets, orientieren sich die weiteren Arbeiten auf eine Optimierung des Anlagenbetriebs beim Einsatz von in Ballen gepresster Biomasse. Die exemplarisch für die

Verbrennung von Seggen dargestellten Ergebnisse wurden ähnlich auch beim Einsatz von Rohrglanzgras und Stroh erzielt. Sie zeigen, dass sowohl anlagentechnische Optimierungen als auch Einflussnahmen auf die Prozessparameter zu einer Reduzierung der Emissionswerte beitragen können. Hierzu zählen unter anderem das Verhältnis von Primär- zu Sekundärluft, Brennraumtemperatur, Veränderungen der Position der Sekundärluftzuführung im Brennraum und der Einbau von Umlenkvorrichtungen zur Turbulenzerhöhung im Bereich des Übergangs der Rauchgase aus der Brennkammer zu den Wärmeüberträgern.

Folgende Anforderungen an die Feuerungstechnologie sollten bei der Verwendung von Paludikultur-Biomasse erfüllt werden:

- Der hohe Aschegehalt der halmgutartigen Paludikultur-Biomasse erfordert ein leistungsstarkes Ascheaustragssystem. Die Leistung des in der bestehenden Anlage vorhandenen Systems reicht nicht aus. Daher sollte ein leistungsstärkeres System eingebaut werden.
- Die sich an den Rosten bildenden und dort anhaftenden größeren Schlackebrocken sollten durch den Einbau von Bewegungselementen im Glutbett oder durch eine sensorgesteuerte Begrenzung der Glutbetttemperatur mittels wassergekühlter Rostsysteme oder Brennmulden verhindert werden.
- Verschmutzungen des Wärmetauschers sollten durch regelmäßige bzw. automatische Reinigung des Wärmetauschers verhindert werden.
- Für den Einsatz besonders verschleißbeständiger Materialien zur Verhinderung von Korrosionen sollten Feuerfestmaterialien (SiC oder ZrO₂) im Feuerraum gewählt werden. Der Wärmetauscher des Heizwerks Malchin sollte durch einen neuen Wärmetauscher aus korrosionsbeständigem Edelstahl ersetzt werden.

Maßnahmen zur Emissionsminderung

Obwohl die Emissionsgrenzwerte eingehalten werden, lassen sich die Emissionen der Anlage noch weiter senken. Im Folgenden wird lediglich auf einige Primärmaßnahmen in der heißen Reaktionszone einer Verbrennungsanlage eingegangen. Sekundäre Maßnahmen können Emissionen ebenfalls verringern. Diese Maßnahmen erfolgen, nachdem die Abgase die Hauptverbrennungszone verlassen haben. Darauf wird hier nicht weiter eingegangen, da die Kosten und der Auf-

wand der im Rahmen dieser Maßnahmen gegebenenfalls vorzunehmenden Umbauten nicht untersucht wurden.

Allgemein gehören zu den Primärmaßnahmen:

- Optimierung der Brennstoffeigenschaften (z.B. Früh-, Späternte, Feuchtigkeit) (siehe Kapitel 2.1)
- Anpassung der Feuerungsanlage (Ballenzubringer, -auflöser, Kohlenstoffmonoxid-Ring, Glutbettaustrag) und
- Anpassung der Regelungstechnik (z.B. Lambda-sonde, Primär- und Sekundärluft).

Primärmaßnahmen, die zur Reduzierung von Stickoxidemissionen führen, sind:

- das Absenken der Temperatur im Brennraum und
- das Reduzieren der Sauerstoffkonzentration in der Hauptverbrennungszone.

Auf der anderen Seite ist zu beachten, dass niedrige Verbrennungstemperaturen zu höheren Kohlenstoffmonoxid- und Kohlenwasserstoffgehalten und Distickstoffmonoxidkonzentrationen im Abgas führen. Daher ist ein feines Justieren der Anlagenparameter nötig, um die optimale Konfiguration zu finden. Ein Reduzieren von Schwefeldioxidemissionen kann mit dem Additiv-Verfahren, häufig auch als Direktentschwefelung bezeichnet, erreicht werden. Dabei wird zum Brennstoff zusätzlich trockener Kalk (CaO) oder Kalksteinmehl (CaCO₃) in den Kessel geblasen, um Schwefeldioxid (SO₂) zu binden.

2.3 Ökonomie/Ökobilanz mal durchgerechnet: So lohnt es sich für Betrieb und Klima

Für die Nutzung von Biomasse nasser Moore als Brennstoff kommen unter den aktuellen ökonomischen Rahmenbedingungen nur Biomasse aus natürlichen Beständen und Reststoffe in Betracht. Die Wertschöpfung bei der Brennstoffnutzung ist zu gering, um die aufwendige Einrichtung von Flächen wie sie für viele stoffliche Nutzungen von Biomasse aus Paludikultur erforderlich ist, zu rechtfertigen. Deshalb betrachtet dieses Kapitel die Ernte bis hin zur Entsorgung, Wiedervernässung und Einrichtungskosten berücksichtigt es nicht.

2.3.1 Ernte, Aufbereitung und Brennstoffbereitstellung

Das Beernten von nassen Wiesen stellt den wichtigsten Kostenfaktor dar, weil der Einsatz von Spezialtechnik und die widrigen Einsatzbedingungen im Vergleich zur Nutzung entwässerter Moorstandorte erhebliche Kosten verursachen (Wichmann, 2017). Die Erntetechnik für nasse Moorböden muss an die Bodenverhältnisse angepasst sein. Hierfür gibt es verschiedene Ansätze: angepasste Grünlandtechnik, Kleintechnik, Ballonreifen, Raupentechnik (Abbildung 31) (Wichmann et al. 2016). Um dauerhaft Erträge erwirtschaften zu können und die Befahrbarkeit abzusichern, ist die Schonung des Bodens besonders wichtig. Dabei spielen der Bodendruck der Maschine und die durch die Kontaktflächen ausgeübten Scherflächen eine wichtige Rolle (Schröder et al. 2015).

Die Größe und das Gewicht der Maschinen sind für diese Eigenschaften nur zum Teil ausschlaggebend. Die für eine hohe Schlagkraft erforderliche Zuladung spielt die größte Rolle und dominiert den Bodendruck. So

kann z.B. bei Kleintechnik und angepasster Grünlandtechnik ein Bodendruck unter 100 g/cm^2 nicht erreicht werden, während speziell angepasste Raupentechnik diesen Wert erst bei einer Zuladung von 7,5 t erreicht (vergleiche Abbildung 31). Kettenbasierte Maschinen mit großen Kontaktflächen über 10 m^2 sind hier das Mittel der Wahl, wenn Bodenschonung und Schlagkraft kombiniert werden sollen (Wichmann et al., 2016). Durch die langen Kontaktflächen entstehen jedoch beim Wenden hohe Scherkräfte die durch angepasstes Befahren vermieden werden müssen.

Hohe Schlagkraft ist erforderlich, um die Erntezeiträume effizient zu nutzen und die Kosten zu senken. Bisher ist solche Technik vor allem in der Landschaftspflege im Einsatz. Auf diesen Erfahrungswerten basieren Einschätzungen zu Arbeitszeitbedarf und Erntekosten. Die Brennstoffernte auf nassen Mooren erfordert außerdem die Möglichkeit, trockene und fremdstofffreie Biomasse zu ernten.

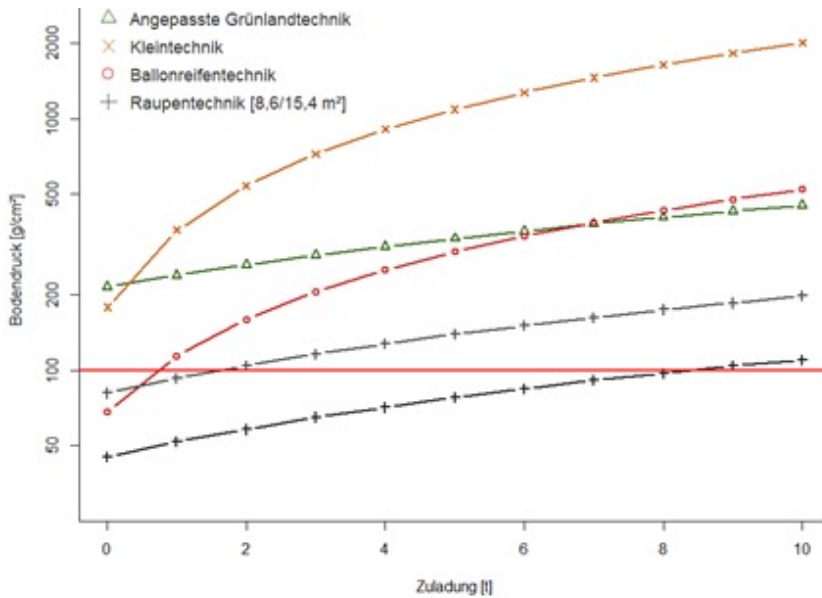


Abb. 31: Bodendruck in Abhängigkeit von der Zuladung für unterschiedliche Technologien. Rote Linie: maximal tolerierbarer Bodendruck auf nassen Moorstandorten (eigene Berechnungen)

Im untersuchten Betrieb Moorhof Neukalen wird an die nassen Bedingungen angepasste Standardtechnik eingesetzt (Abbildung 32 oben links). Diese ist nur während trockenerer Phasen im Sommer auf dem Nass-Grünland einsetzbar. Die Abhängigkeit von günstigen Witterungsbedingungen führt zu erhöhter Unsicherheit, ob die Flächen beerntet werden können. Ggfs. muss bei zwar günstigen Ernteterminen aber hohen Wasserständen

der Erntetermin mit der Hoffnung auf geeignetere Wasserstandsverhältnisse verschoben werden. Eine Ausstattung von Standardtechnik mit möglichst breiten Reifen bei niedrigem Luftdruck und z.B. Tandemachsen bei der Ballenpresse ist verglichen mit den übrigen in Abbildung 32 und 33 dargestellten technischen Lösungen die günstigste Variante.



Abb. 32: Verschiedene Erntemaschinen und -verfahren für die Landschaftspflege/Ernte auf nassen Mooren. Varianten: angepasste Grünlandtechnik des Partnerbetriebes, Grünlandtechnik mit Deltaketten am Bodensee, Kleintechnik für die Landschaftspflege, Brielmaier Motormäher (kombinierter Einachsmäher), Kleintraktor Antonio Carraro. Sommerernte. (Quellen: links oben von P. Schroeder, alle Übrigen Fotos von T. Dahms)



Abb. 33: Verschiedene Erntemaschinen und -verfahren für die Landschaftspflege/Ernte auf nassen Mooren. Varianten: Ballonreifen Seiga für die Ernte von Schilfbündeln (Foto: P. Schroeder), moderne Schilferntemaschine auf Kettenbasis, zweistufiger Grashäcksler auf Kettenbasis, einstufiges Verfahren auf Kettenbasis mit Schlegelmulcher und 9 m³ Bunker und dreistufige Rundballen-Ernte-Verfahren auf Kettenbasis. Sommer- und Winterernte. (Fotos: links oben von P. Schroeder, alle Übrigen von T. Dahms)

2.3.2 Ökonomie

Während für herkömmliche Verfahren der Biomasseernte umfassende Daten und Planzahlen für verschiedene Ernteverfahren vorliegen, besteht im Falle von Biomasse aus Paludikultur eine große Unsicherheit bezüglich Arbeitszeitbedarf und Kosten bei der Biomasseernte. Dies liegt zum einen an der Tatsache, dass noch keine Erfahrungswerte vorliegen und die einzigen verfügbaren Daten aus der Landschaftspflege stammen. Zum anderen liegt es am großen Einfluss, den unterschiedliche Bedingungen sowie Reparatur- und Ausfallzeiten bei der Ernte auf die Ergebnisse haben. Die für die Ernte notwendige Spezialtechnik ist mit hohen Investitions- und Unterhaltskosten verbunden, die nur durch eine hohe Auslastung kompensiert werden können.

Ein untersuchtes Beispiel aus der Landschaftspflege ist die Ernte von Häckselgut mittels kettenbasiertem Spezialfahrzeug mit Schlegelmulcher und 9 m³ Biomasseebunker (siehe Abbildung 33 linke Spalte, 3. Abbildung von oben). Der Gesamtzeitbedarf liegt bei 2,4 h pro ha bei einer Biomasseproduktivität von 2,6 t TM pro ha.

Während Leer- und Transportfahrten weniger Einfluss hatten, war der Zeitanteil beim Entladen neben dem eigentlichen Mähen/Mulchen der wichtigste Faktor für ein Optimieren des Zeitaufwandes. Bei größerer Entfernung zum Ablageort und höherer Biomasseproduktivität wäre der Anteil natürlich höher (vergl. Dahms et al. 2017).

Die Aussagekraft des aufgeführten Beispiels zur Beschreibung der Arbeitszeitbedarfe und -anteile für die Bewirtschaftung nasser Wiesen ist begrenzt (siehe Abbildung 34), weil Faktoren wie Flächenbedingungen (Flächengröße, Wegstrecken und Biomasseproduktivität, Wassergehalt) und Bodeneigenschaften im Einzelfall stark variieren. Deshalb sind Modellrechnungen erforderlich, um eine Abschätzung des Arbeitszeitbedarfs und der Kosten unter ähnlichen Bedingungen zu erhalten.

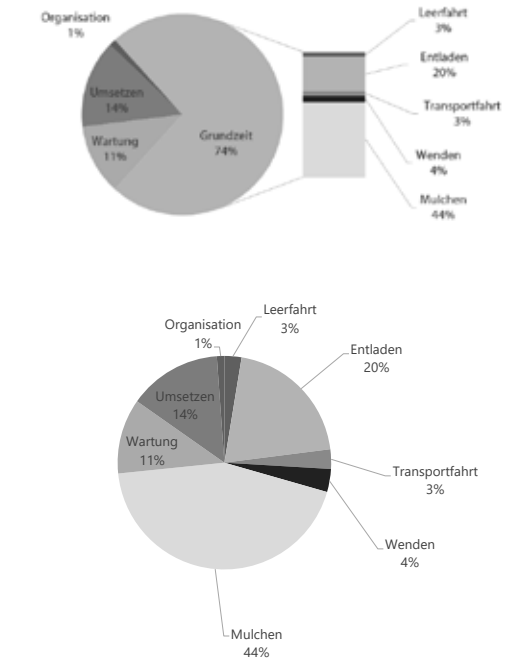


Abb. 34: Arbeitszeitbedarf und -anteile bei einer Ernte von 2,6 t TM pro ha mit 65% Wassergehalt zum Zeitpunkt der Mahd. Gesamtzeitbedarf auf der Fläche 2,4 h pro ha, Grundzeit (Summe der direkt mit der Ernte verbundenen Arbeitsschritte) 1,9 h pro ha.

Um die oben beschriebenen Probleme bei der Vergleichbarkeit der einzelnen Aufnahmen zu kompensieren, wird in Weiterentwicklung eines Ansatzes von de Jong & Schaafsma (2003) und Dahms (2011) sowie diverser weiterer Autoren für andere Verfahren (Borken et al. 1999; Reinhardt & Zemanek 2000; Jäger 1991) ein Modell zur Berechnung der Arbeitszeiten für die Ernte von Biomasse aus Paludikultur angewendet. Die technische Umsetzung des Modells erfolgte in der Scriptsprache R.

Dabei wird die Ernte in einzelne Verfahrensschritte/Teilzeiten nach Technische Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen (TGL) 22289 (DDR, 1975) aufgeteilt, deren Zeitbedarf normalisiert mit Flächengröße, Produktivität und Entfernungen bestimmt und der Gesamtzeitaufwand basierend aus der Summe dieser Teilzeiten berechnet.

Die Ergebnisse dieser Berechnung (Abbildung 35) zeigen, dass die Ernte mit angepasster Grünlandtechnik gegenüber der herkömmlichen Grünlandbewirtschaftung nur wenig Mehraufwand, hier vor allem bei der Bergung der Biomasse, verursacht. Dies ist aber nur auf Standorten realisierbar, die im Sommer zeitweise sehr niedrige Wasserstände unter Flur haben. Dies ist auf den untersuchten Flächen des untersuchten Betriebes Moorhof Neukalen in den Neukalener Wiesen der Fall (vergleiche Abbildung 32 rechts oben).

Die Verwendung anderer standortangepasster Bewirtschaftungstechnik ist deutlich zeitaufwendiger. Herauszuheben ist, dass z.B. mit moderner Dachschild-Erntetechnik eine sehr hohe Ernteleistung erreicht werden kann. Dies liegt vor allem an der hohen Dichte der in Parallellage transportierten Biomasse. Sie verringert die

Anzahl der Transportfahrten auf der Fläche. Die Bergung hat bei allen Varianten einen hohen Anteil am gesamten Zeitaufwand. Durch gesteigerte Transportkapazitäten kann diese verringert werden, wobei der Einfluss auf den Bodendruck zu beachten ist (siehe Abbildung 31). Dies wird beim Vergleich der Verfahren 4 mit großem und kleinem Bunker deutlich (siehe Abbildung 31).

Maßgeblichen Einfluss hat die Auslastung der Maschinen aufgrund hoher Investitionskosten und der ggfs. z.B. durch Störungen oder Defekte auftretenden Ausfallzeiten. Um diese Ausfallzeiten zu minimieren, investieren viele Landschaftspflegeunternehmen und Dachschild-Erntebetriebe erheblich in Wartung und Pflege. Die Kompetenz der maschinenführenden Person hat ebenfalls erheblichen Einfluss auf die Belastung des Bodens und der Maschine.

Die Erntekosten liegen, abhängig von der eingesetzten Ernte- und Transporttechnik, zwischen etwa 52 und 150 € pro t TM bzw. 15 - 37 € pro MWh bezogen auf den Heizwert der Biomasse. Der energetische Aufwand für die Ernte liegt bei unter 10 % (3 bis 8 %) des Primärenergiegehaltes der Biomasse und die THG-Emissionen ebenfalls bei unter 10% des gebundenen Kohlenstoffs (C) („CO₂“).

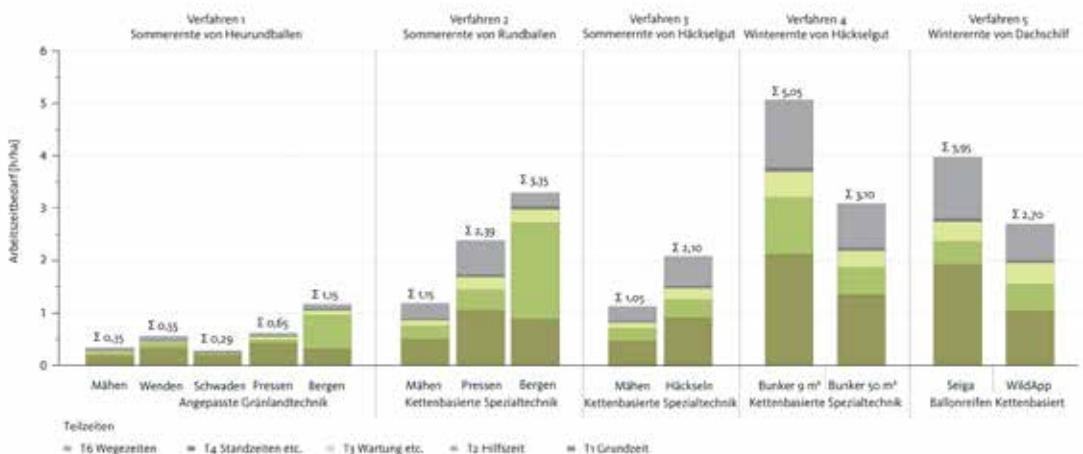


Abb. 35: Ergebnisse der Modellrechnung für die Sommer- und Winterernte von 4 ha mit einer Biomasseproduktivität von 4 t TM pro ha mit verschiedenen Erntemethoden (ergänzt nach Dahms et al., 2017). M=Mähren, W= Wenden, S=Schwaden, P=Pressen, B=Bergen, H=Häckseln, Bu=Bunker, AG=Angepasste Grünlandtechnik, KS=Kettenbasierte Spezialtechnik.

Während bei Erdgas die Wärmebereitstellungskosten nur geringfügig über den Brennstoffkosten liegen – also der Anteil der Brennstoffkosten den weitaus größten Anteil ausmacht – werden die Kosten bei Biomasseheizwerken vor allem durch Investitions- (etwa 800 € pro kW) und laufende Betriebskosten sowie durch Brennstoffkosten bestimmt. Gegenüber fossilen Brennstoffen erfordert die Nutzung von Nasswiesenheu hohe Investitionen sowohl bei der Brennstoffproduktion

(Ernte, Lagerung, Aufbereitung) als auch bei der Nutzung. Neben angepasster Erntetechnik wird speziell angepasste Feuerungs- und Filtertechnik für Halmgüter benötigt. Um unter diesen Bedingungen eine wirtschaftlich tragfähige Wärmebereitstellung realisieren zu können, muss eine hohe Zahl von Volllaststunden (min. 4.000 h pro Jahr) erreicht werden. Dies ist i.d.R. der Fall, wenn die Grund- und Mittellast abgedeckt wird und ein ganzjähriger Wärmebedarf besteht.

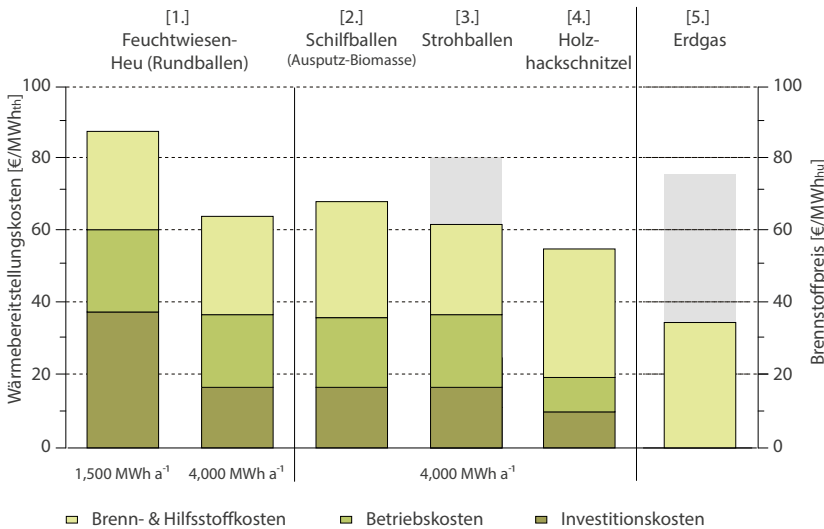


Abb. 36: Wärmebereitstellungskosten, grau: Schwankungsbreite der Stroh- und Erdgas-Preise.

Bei den Betriebskosten der Heizanlage fallen vor allem das Handling der Biomasse, also das Ein- und Auslagern sowie das Bestücken der Anlage, und das Reinigen der Anlage wegen des hohen Ascheaufkommens ins Gewicht. Die Wärmebereitstellungskosten im Falle von Paludikultur-Brennstoffen liegen zwischen 60 und 75 € pro MWh (Abbildung 36). Diese liegen unter den untersuchten Bedingungen aktuell höher als bei der Nutzung von Holzhackschnitzeln oder auch bei Stroh. Die pelletierte Nutzung von halmgutartiger Biomasse ist aktuell nicht wirtschaftlich (vergleiche Box 4). Allerdings ist festzustellen, dass die Bereitstellung von

halmgutartiger Biomasse aus nassen Mooren mit langfristig beständigen, kalkulierbaren Brennstoffkosten verbunden ist und, je nach vereinbarten Lieferbedingungen, nicht der Volatilität des Marktes fossiler Energieträger unterliegt. Die Nutzung von Nasswiesenheu mit fixen Lieferketten führt bei allen Akteur*innen zu hoher Planungssicherheit und beständigen Brennstoffkosten. Heizwerke wie das in Malchin führen zu regionaler Wertschöpfung. Bei vergleichbaren Strohheizwerken beträgt diese bei Errichtung einmalig etwa 155.000 € und im Betrieb jährlich bei etwa 25.000 € (Heinbach et al. 2017).

Box 4: Pelletierung von halmgutartiger Biomasse

Die Nutzung von Pellets bietet gegenüber nicht aufbereiteter Biomasse verschiedene Vorteile bei der Nutzung als Brennstoff und anderen Nutzungen. Zum einen bieten Pellets als Schüttgut mit hoher Dichte Vorteile beim Handling, bei der Lagerung und beim Transport. Bei der Nutzung im Heizwerk bieten Pellets den Vorteil einer automatisierten Zuführung, geringerem Lagerplatzbedarf und der Möglichkeit einer optimalen, da gleichbleibenden, Verbrennungsführung. Obwohl Pellets also aus technischer Sicht das Optimum sind, ist ihre Verwendung aus wirtschaftlicher und produktionstechnischer Sicht schwierig zu realisieren. Die Produktion von Pellets ist nur mit hochqualitativer, trockener und vor allem homogener Biomasse störungsfrei möglich. Entsprechend stellt die Pelletierung hohe Ansprüche an die Bestände, die Ernte und die Lagerung der Biomasse. Außerdem sind die Produktionskosten für Pellets hoch, aufgrund der schwierigen Biomasse ist der Durchsatz im Vergleich zu Holz oder Stroh geringer, so dass im Idealfall die Produktionskosten bei mittleren Anlagen mit zum Beispiel 1,5 t TM Durchsatz pro Stunde bei etwa 100 € pro t Pellets bzw. 20 € pro MWh liegen können, aber auch deutlich darüber (Dahms et al., 2017).

Eine Alternative stellen Anlagen wie die PREMOS 5000 Presse von der Maschinenfabrik Bernard Krone GmbH & Co. KG dar. Diese produzieren Däumlinge mit höherem Durchsatz was die Kosten der Komprimierung aufgrund eines höheren Durchsatzes an Biomasse gegenüber der Pelletierung stark verringert. Hierzu liegen jedoch noch keine Verbrennungsversuche mit Paludikultur-Biomasse vor, es wird aber davon ausgegangen, dass die Vorteile der Pelletierung (hohe Dichte, homogener Brennstoff vergl. Dahms et al., 2017) auch hier erfüllt werden.

2.3.3 Ökobilanzielle Bewertung

Die Ökobilanzierung ist ein Bewertungsverfahren, bei dem die Umwelteinflüsse eines Produktes über dessen gesamten Lebensweg systematisch erfasst und bilanziert werden. Beim Vergleich der Brennstoffe in Bezug auf Treibhausgasemissionen und Energieaufwand wird deutlich, dass bei Paludikultur-Brennstoffen die Emissionen und Aufwendungen höher sind als bei den anderen im Projekt untersuchten Brennstoffen (Stroh und Holzhackschnitzel). Durch die Brennstoffnutzung können aber nichtsdestotrotz zusätzliche Treibhausgasemissionen neben denen aus der reinen Vernässung eingespart werden. Gegenüber den Einsparungen aus Wasserstandsanhhebung sind sie allerdings bei

allen Brennstoffen gering. Paludikultur-Brennstoffe haben also hauptsächlich durch die hohen Einsparungen durch Wiedervernässung und deren Beibehaltung einen erheblichen Vorteil gegenüber Stroh und Holzhackschnitzeln. In Malchin sparen die Substitution von Erdgas etwa 850 t CO₂-Äq. und die Wasserstandsanhörungen sowie deren Beibehalten ca. 3.000 t CO₂-Äq. pro Jahr ein.

Der Vergleich von Biobrennstoffen mit Erdgas zeigt sehr deutlich, dass die THG-Emissionen bei der Verbrennung von Biobrennstoffen höher sind (Abbildung 37). Erst durch die Annahme, dass diese Emissionen neutral sind wird die Bilanz negativ (vergleiche Box 5).

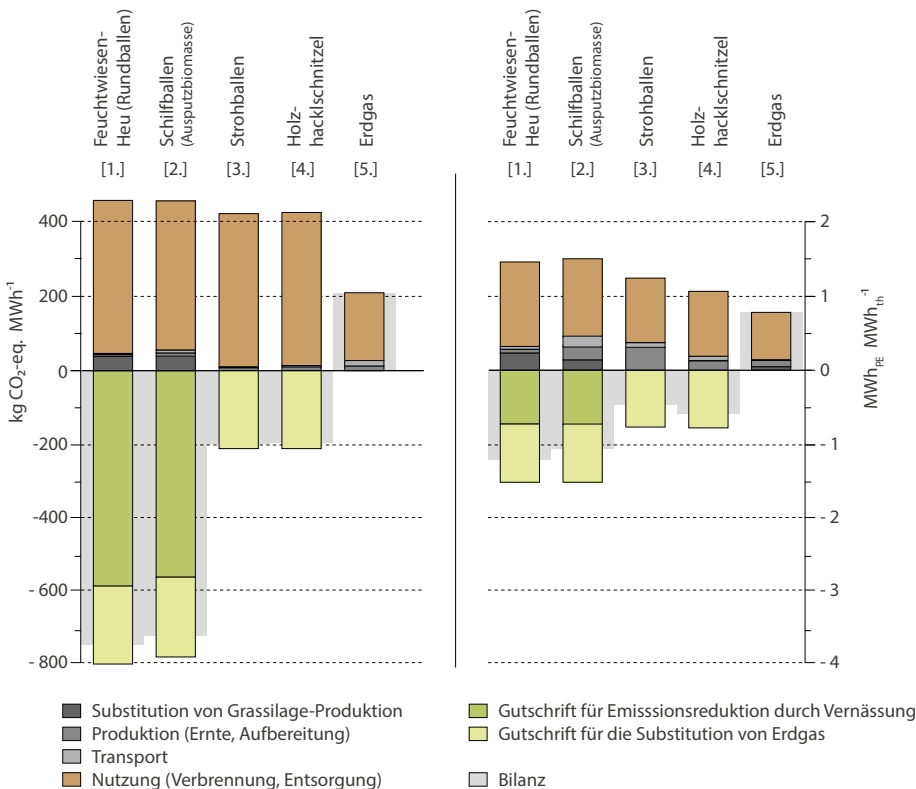


Abb. 37: Vergleich der Treibhausgas- und Energiebilanzen verschiedener Brennstoffe: 1. Nasswiesenheu (Rundballen), 2. Schilfballen (Ausputzbiomasse), 3. Strohballen mit 4. Holzhackschnitzeln und 5. Erdgas) Links: bezüglich ihrer Kohlendioxidemissionen in kg CO₂-Äq. MWh⁻¹. Rechts: bezogen auf MWh_{PE} MWh⁻¹. PE = Primärenergie.

Die alternativ im Heizwerk Malchin verwendbaren Biomasse-Brennstoffe Stroh und Holzhackschnitzel weisen unterschiedliche Schwerpunkte bei den Emissionen und Energieaufwendungen auf. Im Falle von Stroh lässt sich davon ausgehen, dass es sich um einen Reststoff handelt. Etwa 20% des jährlich anfallenden Strohs können in Deutschland im Durchschnitt von den Ernteflächen entnommen werden (Heinbach et al. 2017). Aufwendungen fallen für Pressen, Bergung, Transport und Lagerung sowie für die Ausgleichsdün-

gung an. Vor allem die reduzierte Humusbildung und damit die verringerte Kohlenstoffspeicherung sowie die notwendige Ersatzdüngung fallen ins Gewicht (Heinbach et al. 2017). Bei Holzhackschnitzeln sind das Hacken des Holzes sowie der Transport hervorzuheben, wobei kleinere Forststrukturen zu deutlich höheren Treibhausgasemissionen und Energieaufwendungen beim Transport führen (Zimmer 2010). Halmgut zu verwenden kann auch gegenüber anderen Bioenergieträgern aus verschiedenen Gründen von Vorteil sein (Box 5).

Box 5: Biomassebrennstoff und Klimaschutz – Vorteile von Halmgut gegenüber Holz

Während Halmgut gegenüber Holz deutlich ungünstigere Verbrennungseigenschaften aufweist, bietet es aus Klimaschutzsicht erhebliche Vorteile. Beim Verbrennen von Biomasse müssen aus Klimaschutzsicht verschiedene Aspekte berücksichtigt werden.

Biomasse-Verbrennung verursacht in vielen Fällen höhere Treibhausgasemissionen pro Energieeinheit als fossile Energieträger, da der Primärenergiegehalt im Verhältnis zum Kohlenstoffanteil geringer ist. Gleichzeitig erreicht die Biomasse-Verbrennung auch eine geringere Konversionseffizienz als bei fossilen Energieträgern. In der Summe führt dies dazu, dass das Verbrennen von Biomasse im schlimmsten Fall mehr als die 1,5-fache Menge an Treibhausgasemissionen für die Bereitstellung der selben Menge Wärme/Sekundärenergie verursacht.

Die Annahme, dass das Freisetzen des in der Biomasse gebundenen Kohlendioxids (CO₂) pauschal als neutral angesehen werden kann, ist verbreitet doch unzutreffend, wie von verschiedenen Autor*innen beschrieben (Birdsey et al., 2018; Moomaw, 2017; Beddington et al., 2017). Entscheidend ist, wie schnell der im Rahmen der Verbrennung freigesetzte Kohlenstoffvorrat wiederhergestellt wird. Etwa, wie schnell ein Forst wieder aufwächst, oder wie schnell der in der Pflanze gebundene Kohlenstoff freigesetzt würde, würde er nicht als Brennstoff genutzt (z.B. durch Zersetzung). Aber auch weitere Auswirkungen wie der Verlust von Bodenkohlenstoff und Landnutzungsänderungen etc. müssen berücksichtigt werden. Diese Kohlenstoffschuld der Biomasse muss erst ausgeglichen werden, bevor die Emissionen als neutral anzusehen sind. Erst dann bietet die Biomasseverbrennung einen Vorteil gegenüber fossilen Brennstoffen. Im Falle von Stammholz dauert es etwa 50 Jahre und bei Restholz mindestens ein Jahrzehnt bis dieser Punkt erreicht ist.

Außerdem ist zu berücksichtigen, dass bei einer alternativen Nutzung der Biomasse, z.B. als Baustoff, der Kohlenstoff über Jahrzehnte gebunden bleibt. Gegebenenfalls ließen sich zudem Baustoffe ersetzen, deren Herstellung bereits deutlich höhere Treibhausgasemissionen verursacht. So kann der Einsatz von Holzprodukten durchschnittlich etwa 4 kg CO₂ pro kg einsparen, wobei die Substitution von Erdgas im günstigsten Fall 0,85 kg CO₂ pro kg Holz vermeiden kann. Wenn eine solche alternative, stoffliche Nutzung möglich ist, schneiden Biomassebrennstoffe gegenüber Erdgas oder Heizöl ebenfalls schlecht ab.

Im Vergleich zu Holz haben Halmgüter den erheblichen Vorteil, dass sie bei Nichtnutzung innerhalb weniger Jahre zersetzt werden und ein großer Anteil des gebundenen Kohlenstoffs (C) wieder in die Atmosphäre gelangen würde. In vielen Fällen fehlt auch eine alternative Nutzung für Halmgut oder es lassen sich Reststoffe nutzen, die bei höherwertigen Verwertungen anfallen (z.B. Ausputzbiomasse bei der Dachschilfproduktion).

2.3.4 Empfehlungen

Um unter den aktuellen Bedingungen eine wirtschaftlich tragfähige thermische Nutzung von Biomasse aus nassen Mooren zu realisieren, müssen alle Verfahrensschritte und Rahmenbedingungen optimiert werden. Beim Bereitstellen der Biomasse müssen Erntemaschinen eine möglichst hohe Auslastung haben. Dies lässt sich über das Bewirtschaften eigener Flächen erreichen oder durch das Erbringen von Dienstleistungen in der Landschaftspflege und im Naturschutz. Zusätzlich können Spezialmaschinen z.B. bei der Deichpflege oder bei der Verteilung von Silage im Fahrsilo etc. ausgelastet werden. Wo die Standortbedingungen es zulassen, ist der Einsatz von angepasster Gründlandtechnik die günstigste Lösung. Reststoffe aus der stofflichen Verwertung (z.B. Ausputzbiomasse aus der Dachschilfproduktion) zu nutzen, bietet ebenfalls einen günstigen Pfad zum Bereitstellen von Biomasse-Brennstoffen.

Es ist unbedingt darauf zu achten, nur Brennstoffe mit geringen Gehalten an kritischen Inhaltstoffen zu verwenden, da hohe Folgekosten durch erhöhte Korrosion, Filterbelastung etc. entstehen können. Eine späte Mahd kann auch positive Wirkungen auf den Umweltschutz ausüben. Bei der Logistik muss die Anzahl der Ein- und Auslagerungsvorgänge möglichst gering gehalten werden. Eine Lagerhalle am Heizwerk (statt räumlich getrennt mit zusätzlichem Transportbedarf) ermöglicht erhebliche Einsparungen. Dies wird allerdings nur im Einzelfall möglich sein. Pellets sind für die Lagerung und das Handling ideal, ihre Produktion ist aber sehr teuer.

Für das Errichten neuer Heizwerke kommen nur Standorte in Frage, an denen Wärme gleichmäßig über das Jahr verteilt abgenommen werden kann. Mindestens 4.000 Volllaststunden sind eine Voraussetzung für den wirtschaftlichen Betrieb. Wegen der erheblichen Investitionen und Abschreibungszeiten ist es wichtig, das Heizwerk mit langjährigen Abnahmeverträgen abzusichern.

Aus Sicht des Klimaschutzes ist Halmgut als Brennstoff gegenüber Holz zu bevorzugen. Aus Sicht des Umweltschutzes und der Wirtschaftlichkeit ist sowohl bei Holz als auch bei Halmgütern eine stoffliche Nutzung der energetischen Verwertung vorzuziehen. Ideal ist eine Ko-Nutzung, bei der der qualitativ hochwertige Teil der Biomasse stofflich und die entstehenden Reststoffe energetisch genutzt werden.

Die Wirtschaftlichkeit der Nutzung lässt sich ggf. durch neue Konzepte wie den Verkauf von virtueller Biomassewärme an z.B. Erdgaskunden steigern. Regionale Wertschöpfung und Klimaschutz sind ebenfalls starke Argumente, um Wärmeanbieter und lokale Akteur*innen zu überzeugen.

3. Fazit/zusammenfassende Empfehlungen

Die großen Potentiale, die sich aus der Wiedervernässung der Moore in Deutschland für die Einrichtung von Paludikulturen ergeben, sollten für ein weites Spektrum von Verwertungsmöglichkeiten der anfallenden Biomasse genutzt werden. Beim Einrichten von Paludikulturen sollte die stoffliche Verwertung der zu erntenden Biomasse im Vordergrund stehen. Allerdings sind die wiedervernässten Flächen, die damit gebunden werden können, voraussichtlich anfangs eher gering (Orientierung auf spezifische Biomassen, Erschließung von Märkten etc.). Für die stoffliche Verwertung wird ein kurzfristiger Aufbau von Verarbeitungskapazitäten als schwierig angesehen. Die energetische Verwertung hat hier große Vorteile bezüglich einer kurzfristigen Entwicklung von Flächenverfügbarkeit und Biomasseaufnahmekapazität. Daher hat die energetische Verwertung eine Perspektive als Übergangstechnologie: Sie kann relativ kurzfristig lokal große Biomassenachfrage erzeugen und regionale Stoffströme sowie Wirtschaftsbeziehungen fördern. Damit werden Emissionen durch Wiedervernässung langfristig reduziert und fossile Energieträger ersetzt. Beim Einlagern der Heu-Ballen sollte ein optimaler Wassergehalt der Biomasse im Vordergrund stehen, dies ist aber nicht in jedem Erntejahr möglich. Saisonal bedingt können zu hohe Wasserstände in der Fläche oder anhaltend hohe Niederschläge den optimalen Erntezeitpunkt vereiteln. Um kurzfristig gute Witterungsbedingungen ausnutzen zu können, ist eine hohe Schlagkraft der vorgehaltenen Ernte- und Transporttechnik wichtig. Noch idealer wäre gegebenenfalls die Verfügbarkeit zusätzlicher alternativer Verwertungsmöglichkeiten für nasse oder feuchte Biomasse, um witterungsunabhängig wirtschaften zu können. Ein Beispiel dafür sind Wertschöpfungsketten, die silierte Biomasse verwerten können. Bei der Nasswiesenbewirtschaftung anfallende Biomasse eignet sich für die thermische Verwertung auf-

grund einiger kritischer Eigenschaften nicht optimal (Heterogenität, Verbrennungsverhalten etc.). Ein gezieltes Management der Pflanzenbestände oder ein Anpassen der Erntetechnik bzw. der Verbrennungstechnik optimiert Qualitäten und Eigenschaften.

Der Landwirtschaftsbetrieb hat verschiedene Möglichkeiten, die Qualität der Biomasse aus nassen Mooren zu beeinflussen. Gesteuert werden kann auf der einen Seite bei der Wahl des Erntetermins oder dem Gestalten des Ernteverfahrens, z.B. bei der Bodentrocknung (Auswaschung) des Heus. Auf der anderen Seite lässt sich die Vegetationszusammensetzung gestalten, ebenfalls über den Termin der Ernte und ggf. eine zweite Mahd.

Auch der Betreiber der Wärmebereitstellungsanlage hat diverse Möglichkeiten der Optimierung. Obwohl die Emissionswerte bereits den Anforderungen entsprechen, kann eine weitere anlagentechnische Optimierung und Einflussnahme auf die Prozessparameter (z.B. Verhältnis von Primär- zu Sekundärluft, Brennraumtemperatur etc.) Emissionswerte weiter reduzieren. Unter anderem kann eine veränderte Position der Sekundärluftzuführung im Brennraum und der Einbau von Umlenkvorrichtungen zur Turbulenzerhöhung im Bereich des Übergangs der Rauchgase aus der Brennkammer zu den Wärmetauschern dies erreichen.

Das Umstellen der Moorbewirtschaftung auf Paludikultur erfordert es, Mindeststandards (hoher Grundwasserspiegel, angepasste Vegetation, geringe Emissionen, produktive Nutzung) einzuhalten. Dies ist notwendig, damit die mit nassen Mooren verbundenen Ökosystemleistungen (insbesondere die Reduktion von Treibhausgas und Nährstoffemissionen) erreicht werden können. Eine ausreichende Anhebung des Wasserspiegels ist die Grundvoraussetzung, um die Torfmineralisierung zu stoppen und die Treibhausgasemissionen zu minimieren. Dies erfordert durchschnittliche Grundwasserspiegel

im Sommer von nicht unter 10 cm unter Flur. Im Winter sollten diese immer höher sein um ggf. durch Überstau gezielt ausreichend Wasser für den Sommer vorzuhalten. Insofern muss die Erntetechnik an die Standortbedingungen angepasst werden. Eine hohe Schlagkraft ist vorzuhalten, um optimale Erntefenster ausnutzen zu können. Dies ist umso wichtiger, wenn aufgrund hoher Grundwasserstände keine angepasste Grünlandtechnik mehr zum Einsatz kommen kann, sondern auf Spezialtechnik (Maschinen mit Ballonreifen oder Kettenfahrwerken) zurückgegriffen werden muss. Erntemaschinen sollten hoch ausgelastet sein, um die Kosten der Biomassebereitstellung zu minimieren.

Die Nutzung von Paludikultur-Biomasse als Brennstoff kann zusätzlich Emissionen von Treibhausgasen reduzieren - einerseits über das Vernässen des Moorstandortes und andererseits durch Ersatz der Nutzung von fossilen Brennstoffen wie Erdgas. Allerdings betragen diese zusätzlichen Einsparungen im Vergleich zu den Einsparungen durch die Wiedervernässung der Flächen nur etwa ein Viertel. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht stellt das Nutzen der nassen Wiesen eine Herausforderung dar, die nur unter günstigen Rahmenbedingungen wirtschaftlich ist. Allerdings ist zu vermuten, dass sich diese Rahmenbedingungen mit steigenden Preisen für fossile Energieträger zu Gunsten der Verwertung von Biomasse aus der nasser Moorbewirtschaftung ändern. Der gesellschaftliche Nutzen durch regionale Wertschöpfung und Landschaftspflege spricht schon heute für eine Verwertung der Biomasse aus nassen Mooren.

4. Literaturhinweise / Links

- Barz, M., Wichtmann, W., Bork, L., Dahms, T., Kabengele, G., Körner, N., Oehmke, C., Wenzel, M. (2019): Rewetted Peatlands as Source for Bioenergy Production - 19th International Scientific Conference - "Sakharov Readings: Environmental Problems of the 21st Century" Minsk, May 23rd–24th. 15 p.
- Barz, M., Wichtmann, W. (2017): Rewetted Peatlands as Source for Bioenergy Production, In: ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК, 98–104. ISSN 1994-2087.
- Beddington, J., Berry, S., Caldeira, K., Cramer, W. (2017): EU must not burn the world's forests for "renewable" energy. Guardian Letters. <https://www.theguardian.com/environment/2017/dec/14/eu-must-not-burn-the-worlds-forests-for-renewable-energy> (with status of 9th March 2022)
- Birdsey, R., Duffy, P., Smyth, C., Kurz, W.A., Dugan, A.J., Houghton, R. (2018): Climate, economic, and environmental impacts of producing wood for energy. Environmental Research Letters 13, 1–9.
- Bork, L. (2019): Thermische Moorgrünlandverwertung in Malchin, Konferenzbeitrag „Brandenburgs Moore klimafreundlich bewirtschaften Chancen für die Landwirtschaft!"; Potsdam. [ppt]
- Czubaszek, R., Wysocka-Czubaszek, A., Wichtmann, W., Banaszuk, P. (2021): Specific Methane Yield of Wetland Biomass in Dry and Wet Fermentation Technologies. Energies 2021, 14, 8373. <https://doi.org/10.3390/en14248373>, 20 p.
- Dahms, T., Oehmke, C., Kowatsch, A., Abel, S., Wichmann, S., Wichtmann, W., Schröder, C. (2017): Halmgutartige Festbrennstoffe aus nassen Mooren. (2. Auflage). Universität Greifswald, Greifswald. [https://www.moorwissen.de/doc/publikationen/paludi_pellets_broschuere/downloads/Dahms et al. \(2017\) Paludi-Pellets-Broschüre.pdf](https://www.moorwissen.de/doc/publikationen/paludi_pellets_broschuere/downloads/Dahms_et_al._(2017)_Paludi-Pellets-Broschüre.pdf)
- DDR (1975): Zeitgliederung in der Land- und Forstwirtschaft (TGL 22289). Agrartechnik 25, 402–403.
- de Jong, M., van Hal, O., Pijlman, J., van Eekeren, N., Junginger, M. (2021): Paludiculture as paludifuture on Dutch peatlands: An environmental and economic analysis of Typha cultivation and insulation production. Science of The Total Environment 792, 148161. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148161>. 12p.
- Eltrop, L., Hartmann, H., Poboss, N. (2016): Leitfaden Feste Biobrennstoffe (4. Auflage). FNR. 211 S. ISBN 9783000153891. http://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/leitfadenfestebiobrennstoffe_web.pdf (Stand 9.3.2022)
- Gensior, A., Zeitz, J. (1999): Einfluss einer Wiedervernässungsmaßnahme auf die Dynamik chemischer und physikalischer Bodeneigenschaften eines degradierten Niedermooses. Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung, Vol. 38, 267–302.
- Hartmann, H. (2001): Die energetische Nutzung von Stroh und strohähnlichen Brennstoffen in Kleinanlagen. Energetische Nutzung von Stroh, Ganzpflanzengetreide und weiterer halmgutartiger Biomasse. Gülzower Fachgespräche, 17, 62–84.
- Hartmann, H., Böhm, T., & Maier, L. (2000). Naturbelassene biogene Festbrennstoffe: umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten; [Abschlussbericht]. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen. https://www.lfu.bayern.de/energie/biogene_festbrennstoffe/doc/festbrennstoffe.pdf. 155 S.
- Heinbach et al. (2017) Heizen mit Stroh – eine Analyse der regionalökonomischen und ökologischen Effekte von Strohheizungen. Abschlussbericht. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung. Heizen mit Stroh eine Analyse der regionalökonomischen und ökologischen Effekte von Strohheizungen. 75 S.
- Kaltschmitt, M., Hartmann, H. & Hofbauer, H. (Hrsg.) (2016): Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken

- und Verfahren. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 3. Auflage. 1759 S.
- Koppejan, J., Van Loo, S. (Eds.). (2012): The handbook of biomass combustion and co-firing. Routledge. 464 p.
- Liu, J., Kopold, P., van Aken, P.A., Maier, J., Yu, Y. (2015): Energy Storage Materials from Nature through Nanotechnology: A Sustainable Route from Reed Plants to a Silicon Anode for Lithium-Ion Batteries. *Angewandte Chemie, International Edition* 5. 9632–9636. <https://doi.org/10.1002/anie.201503150>
- Moomaw, W. (2017): Myth of Carbon Neutrality of Biomass. 5 p. <http://www.perspectivesecologiques.com/telechargements/SOSFSUD%20Myth%20of%20Carbon%20Neutrality%20of%20Biomass%20Pr%20William%20Moomaw%20Tufts%20University.pdf> (with status of 9th March 2022)
- Martens, M., Karlsson, N.P.E., Ehde, P.M., Mattsson, M., Weisner, S.E.B. (2021): The greenhouse gas emission effects of rewetting drained peatlands and growing wetland plants for biogas fuel production. *Journal of Environmental Management*, Volume 277. 9 p. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111391>
- Närman, F., Birr, F., Kaiser, M., Nerger, M., Luthardt, V., Zeitz, J., Tanneberger, F. (Hrsg.) (2021): Klimaschonende, biodiversitätsfördernde Bewirtschaftung von Niedermoorböden. BfN Skript 616. 342 S.
- Nordt, A., Abel, S., Eberts, J., Hoffmann, T., Kost, A., Lampe, M., Peters, J., Wichtmann, W. (2020): Machbarkeitsstudie Aufwuchsverwertung und Artenvielfalt in der Leader-Region „Kulturlandschaften Osterholz“. Michael Succow Stiftung. 174 S.
- Obernberger, I., Brunner, T., Bärnthaler, G. (2006): Chemical properties of solidbiofuels – significance and impact. *Standarisisation of Solid Biofuels in Europe. Biomass Bioenergy* 30(11). 973–982. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.011>
- Öhman, M., Boman, C., Hedman, H., Nordin, A., Boström, D. (2004): Slagging tendencies of wood pellet ash during combustion in residential pellet burners. *Biomass and Bioenergy*, 27(6). 585–596.
- Osowski, S., Neumann, J., Fahlenkamp, H. (2004): Nutzung biogener Festbrennstoffe in Vergasungsanlagen. *Chemie Ingenieur Technik*, 76(7). 1004–1012.
- Reid, W. V. (2005): Millennium ecosystem assessment. 585–596. <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf> (with status of 9th March 2022)
- Schröder, C., Dahms, T., Paulitz, J., Wichtmann, W., Wichmann, S. (2015): Towards large-scale paludiculture: addressing the challenges of biomass harvesting in wet and rewetted peatlands. *Mires and Peat* 16. 1–18.
- Shuai, W., Chen, N., Li, B., Zhou, D., Gao, J. (2016): Life cycle assessment of common reed (*Phragmites australis* (Cav) Trin. ex Steud) cellulosic bio-ethanol in Jiangsu Province, China. *Biomass and Bioenergy* 92. 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.06.002>
- Strandberg, A., Skoglund, N., Thyrel, M., Lestander, T. A., Broström, M., Backman, R. (2019): Time-resolved study of silicate slag formation during combustion of wheat straw pellets. *Energy & Fuels*, 33(3). 2308–2318.
- Thrän, D., Wirkner, R., Kaltschmitt, M. (2016): 7.1 Randbedingungen und Anforderungen. *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 328.
- Tonn, B., Thumm, U., Claupein, W. (2008): Verbrennungseignung von Landschaftspflegeheu. *Naturschutz und Landschaftsplanung*, 11. 367–372.
- Tonn, B., Thumm, U., Claupein, W. (2010): Semi-natural grassland biomass for combustion: influence of botanical composition, harvest date and site

- conditions on fuel composition. *Grass and Forage Science*, 65(4). 383–397.
- Vetter, A. (2001): Qualitätsanforderungen an halmgutartige Bioenergieträger hinsichtlich der energetischen Verwertung. Energetische Nutzung von Stroh, Ganzpflanzengetreide und weiterer halmgutartiger Biomasse. Stand der Technik und Perspektiven für den ländlichen Raum. *Gülzower Fachgespräche*, 17. 36–50.
- Vogel, A. (2007): Decentralized heat and power supply from biogenic solid fuels. A technical and economic evaluation of the gasification in comparison to combustion. 263 p. [Thesis/Dissertation]
- Wichmann, S. (2017): Commercial viability of paludiculture: A comparison of harvesting reeds for biogas production, direct combustion, and thatching. *Ecological Engineering* 103, 497–505. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.03.018>
- Wichmann, S. (2016): Betriebswirtschaftliche Aspekte von Paludikultur, in: Wichmann, W., Schröder, C., Joosten, H. (Hrsg.) *Paludikultur – Bewirtschaftung nasser Moore; Klimaschutz – Biodiversität – regionale Wertschöpfung*. Schweizerbart Verlag. 272 S.
- Wichmann, S., Dettmann, S., Dahms, T. (2016): *Landtechnik für nasse Moore*, in: Wichmann, W., Schröder, C., Joosten, H. (Hrsg.) *Paludikultur – Bewirtschaftung nasser Moore; Klimaschutz – Biodiversität – regionale Wertschöpfung*. Schweizerbart Verlag. 272 S.
- Wichmann, S., Krebs, M., Kumar, S., Gaudig, G. (2020): Paludiculture on former bog grassland: Profitability of Sphagnum farming in North West Germany. *Mires Peat*. 18 p. <https://doi.org/10.19189/MaP.2019.SNPG.StA.1768>
- Wichtmann, W., Schröder, C., Joosten, H. (Hrsg.) (2016) *Paludikultur – Bewirtschaftung nasser Moore; Klimaschutz – Biodiversität – regionale Wertschöpfung*. Schweizerbart Verlag. 272 S.
- Wichtmann, W., Barz, M., Bork, L., Dahms, T., Kabengele, G., Körner, N., Oehmke, C., Wenzel, M. (2019): BOnaMoor-Biomasseproduktion und Optimierung auf nassen Moorstandorten und deren thermische Verwertung. 13. *BioEnergie Forum Rostock. Schriftenreihe Umweltingenieurwesen*, Band 87. 135–145 S. https://bioenergieforum.auf.uni-rostock.de/files/Tagungsband_13_BEF_2019.pdf (Stand 9.3.2022)
- Wulf, A. (2008): Endbericht zum Teilprojekt „Charakterisierung und Analyse der Biobrennstoffe „Schilfrohr“ und „Rohrglanzgras“ und Verbrennungstests“, Forschungsprojekt „Energiebiomasse aus Niedermooren“ (ENIM). FH Stralsund. unveröffentlicht. 83 S.
- Zhao, W., Wen, J., Zhao, Yanming, Wang, Z., Shi, Y., Zhao, Yan (2020): Hierarchically Porous Carbon Derived from Biomass Reed Flowers as Highly Stable Li-Ion Battery Anode. *Nanomaterials* 10, 346. 11 p. <https://doi.org/10.3390/nano10020346>
- Zeng, T., Kristöfel, C., Wopienka, E., Weller, N., & Lenz, V. (2011): *MixBio-Pells: Verbesserung der Marktrelevanz alternativer Biomasse(misch-)pellets in Europa*. 12 p. https://www.dbfz.de/fileadmin/MixBioPells/publications/presentations/MixBioPells_Rosstocker_Bioenergieforum_Tagungsband_final_01.pdf (with status of 9th March 2022)
- Zimmer, D. (2010): *Ökobilanz Waldhackschnitzel*. LWF aktuell 74. 22-25.

5. Nachweise für Abbildungen und Tabellen

Abb. 1: Beispiele für die stoffliche (oben) und energetische (unten) Verwertung von Biomasse aus nassen Mooren (Foto oben: S. Melchior, Foto unten: T. Dahms)

Abb. 2: Schematische Darstellung der emissionsbildenden Elemente (unten) und den daraus im Verbrennungsprozess entstehenden Molekülen bei Zuführung von Sauerstoff

Abb. 3: Die große Königslibelle, *Anax imperator* (Foto: M. Wenzel)

Abb. 4: Das breitblättrige Knabenkraut, *Dactylorhiza majalis* (Foto: M. Wenzel)

Abb. 5: Artenreiche Nasswiese (Foto: M. Wenzel)

Abb. 6: Erträge der Projektflächen gemessen an den Erntemengen aus den Daueruntersuchungsplots

Abb. 7: Gesamte über die Ernte der Biomasse von den Projektflächen exportierte Nährstoffmenge, dargestellt nach Erntezeitpunkt. FS = Fangstand; KL = Knick-Links; KR = Knick-Rechts; SW = Seewiese

Abb. 8: Stickstoffgehalte der Biomasse von verschiedenen Pflanzengruppen je nach Erntezeit

Abb. 9: Kaliumkonzentrationen der Biomasse von verschiedenen Pflanzengruppen je nach Erntezeit

Abb. 10: Chlorkonzentrationen der Biomasse von verschiedenen Pflanzengruppen je nach Erntezeit

Abb. 11: Errechnete Indikatorwerte aus „ $K/(Mg+Ca)$ “ für Pflanzengruppen je nach Erntezeit

Abb. 12: Errechnete Indikatorwerte aus „ $K/(Mg+Ca)$ “ der verschiedenen Projekt-

flächen je nach Erntezeit

Abb. 13: Verbrennungsreaktion (HTW Berlin)

Abb. 14: Phasen der Feststoffverbrennung (HTW Berlin)

Abb. 15: Unterteilung der verschiedenen Feuerungsarten

Abb. 16: Aufteilung der brennstofftechnischen Eigenschaften und deren Durchführungsvorschriften nach DIN

Abb. 17: Bioheizwerk Malchin (Anlage (Quelle: Agrotherm GmbH, 2019))

Abb. 18: Prinzip des Aufbaus des Heizwerks Malchin (Quelle: Agrotherm GmbH, 2019)

Abb. 19: Nasswiesenbestände in den Moorwiesen bei Neukalen mit Schilfröhricht (links) und Rohrglanzgrasbestand (rechts) (Fotos: M. Barz)

Abb. 20: Bestückung des Förderbands mit Niedermoorbiomasse-Rundballen (Foto: G. Kabengele)

Abb. 21a: Probenahmestelle vor Staubfilter (Foto: G. Kabengele)

Abb. 21b: Probenahmestelle vor Rauchgaskamin (Foto: G. Kabengele)

Abb. 22: Pellets aus Niedermoorbiomasse (Foto: T. Dahms)

Abb. 23: Emissionswerte bei der Verbrennung von Halmgutpellets im Heizwerk Malchin bei 800 kW Nennleistung (Werte aus der Messkampagne im Februar 2019)

Abb. 24: Emissionswerte bei der Verbrennung von Seggen im Heizwerk Malchin bei 800 kW Nennleistung aus Verbrennungsversuchen am Heizwerk Malchin, 02/2020 (Segge-Ballen) Werte aus der Messkampagne im Februar 2020

Abb. 25: Kleinfeuerungsanlage an der HTW Berlin (Fotos: G. Kabengele)

Abb. 26: Pelletproben für Verbrennungsversuche in der Kleinfeuerungsanlage

Abb. 27: Gemittelte Kohlenstoffmonoxidemissionen der Messreihen mit Biomassepellets aus Holz, Schilf, Rohrglanzgras (RGG) und Schilf-Rohrglanzgras-Mischung (Mix) mit zwei Wiederholungen (1 und 2) in der Kleinfeuerungsanlage B (auf 13% Bezugssauerstoff gerechnet)

Abb. 28: Gemittelte Stickstoffoxidemissionen der Messreihen mit Biomassepellets aus Holz, Schilf, Rohrglanzgras (RGG) und Schilf-Rohrglanzgras-Mischung (Mix) mit zwei Wiederholungen (1 und 2) in der Kleinfeuerungsanlage (auf 13% Bezugssauerstoff gerechnet)

Abb. 29: Gemittelte Schwefeldioxidemissionen der Messreihen mit Biomassepellets aus Holz, Schilf, Rohrglanzgras (RGG) und Schilf-Rohrglanzgras-Mischung (Mix) mit zwei Wiederholungen (1 und 2) in der Kleinfeuerungsanlage (auf 13% Bezugssauerstoff gerechnet)

Abb. 30a: Verbrennungsrückstand Mixpellets (Foto: G. Kabengele)

Abb. 30b: Asche der Schilfpellets (Foto: G. Kabengele)

Abb. 31: Bodendruck in Abhängigkeit von der Zuladung für unterschiedliche Technologien. Rote Linie: maximal tolerierbarer Bodendruck auf nassen Moorstandorten (eigene Berechnungen)

Abb. 32: Verschiedene Erntemaschinen und -verfahren für die Landschaftspflege/Ernte auf nassen Mooren. Varianten: angepasste Grünlandtechnik des Partnerbe-

etriebes, Grünlandtechnik mit Deltaketten am Bodensee, Kleintechnik für die Landschaftspflege, Brielmaier Motormäher (kombinierter Einachsmäher), Kleintraktor Antonio Carraro. Sommerernte. (Quellen: links oben von P. Schroeder, alle Übrigen von T. Dahms)

Abb. 33: Verschiedene Erntemaschinen und -verfahren für die Landschaftspflege/Ernte auf nassen Mooren. Varianten: Ballonreifen Seiga für die Ernte von Schilfbunden (P. Schroeder), moderne Schilferntemaschine auf Kettenbasis, Zweistufiger Grashäcksler auf Kettenbasis, einstufiges Verfahren auf Kettenbasis mit Schlegelmulcher und 9 m³ Bunker und Dreistufiger Rundballen-Ernte-Verfahren auf Kettenbasis. Sommer- und Winterernte. (Quellen: links oben von P. Schroeder, alle Übrigen von T. Dahms)

Abb. 34: Arbeitszeitbedarf und -anteile bei einer Ernte von 2.6 t TM per ha mit 65% Wassergehalt zum Zeitpunkt der Mahd. Gesamtzeitbedarf auf der Fläche 2,4 h per ha, Grundzeit (Summe der direkt mit der Ernte verbundenen Arbeitsschritte) 1,9 h per ha.

Abb. 35: Ergebnisse der Modellrechnung für die Sommer- und Winterernte von 4 ha mit einer Biomasseproduktivität von 4 t TM/ha mit verschiedenen Erntemethoden (ergänzt nach Dahms et al., 2017). M = Mähen, W = Wenden, S = Schwaden, P = Pressen, B = Bergen, H = Häckseln, Bu = Bunker, AG = Angepasste Grünlandtechnik, KS = Kettenbasierte Spezialtechnik.

Abb. 36: Wärmebereitstellungskosten,

grau: Schwankungsbreite der Stroh- und Erdgas-Preise.

Abb. 37: Vergleich der Emissionen bei der Verwendung verschiedener Brennstoffe:

1. Nasswiesenheu (Rundballen),
2. Schilfballen (Ausputzbiomasse),
3. Strohballen mit 4. Holzhackschnitzeln und 5. Erdgas) Links: bezüglich ihrer Kohlendioxid-Emissionen in kg CO₂-Äq. MWh⁻¹. Rechts: bezogen auf MWhPE MWh⁻¹. PE = Primärenergie.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der energetischen und stofflichen Verwertung im Vergleich

Tabelle 2: Qualitätsparameter biogener Festbrennstoffe und deren verbrennungsrelevanten Auswirkungen (verändert nach Hartmann et al. 2000) Tabelle 3: Eigenschaften von Paludi-Pellets im Vergleich zu biogenen Festbrennstoffen; Daten aus: 1 = Osowski et al. 2004; 2 = Thrän et al. 2001; 3 = Dahms et al. 2017; 4 = Tonn et al. 2008; TM = Trockenmasse; FM = Frischmasse

Tabelle 4: Charakterisierung der Projektflächen (fett = bestandsbildende Arten, Ertrag: Durchschnittswerte über mehrere Jahre)

Tabelle 5: Abhängigkeit Feuerungsarten von Beschickung, Brennstoffe, m = mechanisch, p = pneumatisch (FNR, 2014)

Tabelle 6: Emissionsgrenzwerte BImSchV/ TA-Luft für Biomassebrennstoffe (FNR 2014)

Tabelle 7: Brennstofftechnische Eigenschaften der Brennstoffprobe

(Seggen, Schilf, RGG, RGG + Schilf). RGG = Rohrglanzgras. Ergebnisse aus den Labormessungen

Tabelle 8: Kritische Inhaltsstoffe: Chlor- und Schwefelgehalte der untersuchten Biomasse, Durchführung nach DIN EN ISO 16994

Tab. 9: Kohlenstoffoxid- und Stickstoffoxidmesswerte für Nasswiesenbiomasse und Grenzwerte nach TA Luft

Impressum

Herausgeberin: Universität Greifswald
Institut für Botanik und Landschaftsökologie
Soldmannstr. 15, 17487 Greifswald
Partner im Greifswald Moor Centrum

Autoren: Maximilian Wenzel, Guy Kabengele, Tobias Dahms,
Mirko Barz & Wendelin Wichtmann

Kontakt: info@paludikultur.de

Diese Broschüre wurde durch das Bundeslandwirtschaftsministerium (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) gefördert. Sie ist entstanden im Projekt BOnaMoor (Biomasseproduktion und Optimierung auf nassen Moorstandorten und deren thermische Verwertung).

Auflage: 1. Ausgabe April 2022

Redaktion: kritische Durchsicht Monika Hohlbein und Claudia Oehmke,
Redaktion Nina Körner.

Druck: Druckhaus Panzig, Greifswald
Umsetzung: Vreni Knödler

Gedruckt auf umweltfreundlichem Recyclingpapier
(Umschlag CircleOffset Premium White weiß, Innenseiten: CircleOffset Premium White)

Alle Angaben ohne Gewähr.

Für Schäden, die durch die Nutzung dieser Broschüre entstehen, sowie für Entscheidungen, die auf Basis der bereitgestellten Informationen und Daten getroffen werden und deren Folgen daraus, schließen die Veröffentlichenden jegliche Haftung aus.

Bildhinweis zum Cover: Heuwerbung auf Feuchtwiesen am Kummerower See; Verbrennung von Niedermoor-Biomasse im Heizwerk Malchin (beide Fotos: Tobias Dahms)



UNIVERSITÄT GREIFSWALD
Wissen lockt. Seit 1456



htw.

Hochschule für Technik
und Wirtschaft Berlin

University of Applied Sciences

Gefördert von:



Universität Greifswald
Institut für Botanik und Landschaftsökologie
Partner im Greifswald Moor Centrum
www.greifswaldmoor.de
Weiterführende Informationen: www.moorwissen.de

Biomasse Emissionsre
Umwelt **Nass** Wer
hmoor Biodiversität
chutzz **Moornutzung**
inland **Paludikultur** Kohlenst
esen Grundwasser **Landwirtschaft** Energi
ung Torferhalt Greifswald **Kohlenstoffzertifika**
moor Artenvielfalt Dachschilf