

NEUE ENERGIEN 2020

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

19/12/2013

Projekttitlel:

ENEREED

Sustainable Energy Conversion from Reed

Projektnummer: 821.882

Neue Energien 2020 - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	2. Ausschreibung NEUE ENERGIEN 2020
Projektstart	01/10/2009
Projektende	31/05/2013
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	42 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Fachhochschule Burgenland GmbH
Ansprechpartner	DI DI(FH) Jürgen Krail
Postadresse	Steinamangerstraße 21, A-7423 Pinkafeld
Telefon	+43 (0)3357 45370
Fax	+43 (0)3357 45370-1010
E-mail	juergen.krail@fh-burgenland.at
Website	www.fh-burgenland.at

ENEREED

Sustainable Energy Conversion from Reed

AutorInnen:

Fachhochschule Burgenland GmbH
Jürgen Krail, Doris Rixrath, Helmut Plank, Arne Ragossnig, Christian Wartha

Technische Universität Wien
Hannes Kitzler, Christoph Pfeifer, Hermann Hofbauer

Technisches Büro für Maschinenbau und Energietechnik Beckmann
Georg Beckmann

INHALTSVERZEICHNIS

1	AUFGABENSTELLUNG, SCHWERPUNKTE, METHODIK UND EINORDNUNG IN DAS PROGRAMM	7
1.1	Aufgabenstellung	7
1.2	Schwerpunkte	8
1.3	Methodik	9
1.4	Einordnung in das Programm	10
2	RAHMENBEDINGUNGEN UND NATURSCHUTZRECHTLICHE VORAUSSETZUNGEN FÜR DIE SCHILFERNTE	11
2.1	Ausbreitung und Flächenertrag Schilfgürtel	11
2.2	Schilfbewirtschaftung	14
2.3	Naturschutzorientierte Bewirtschaftung	15
3	BRENNSTOFFTECHNISCHE EIGENSCHAFTEN VON SCHILF	18
3.1	Schilfpflanze	18
3.2	Brennstoffkategorisierung	20
3.3	Brennstoffeigenschaften	21
3.4	Einschätzung des Korrosionsrisikos bei Verbrennung von Schilf	23
3.4.1	Korrosionskennzahl I: Schwefel-Chlor-Verhältnis	23
3.4.2	Korrosionskennzahl II: Chlorkorrosionszahl	24
3.4.3	Korrosionskennzahl III: Alkali-Index	25
3.4.4	Korrosionskennzahlen für Schilf	25
4	METHODIK ÖKONOMISCHE- ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG	27
4.1	Ökonomische Bewertung	27
4.1.1	Ökonomische Bewertung – Teilkostenrechnung	27
4.1.2	Ökonomische Bewertung – Grenzvermeidungskosten CO ₂ - Emissionen	28
4.2	Ökologische Bewertung	29
5	ERNTETECHNIK, VERARBEITUNG UND LOGISTIK	31
5.1	Erntetechnik	31
5.1.1	Zielsetzung, Materialien und Methodik	31

5.1.2	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	31
5.1.3	Ausblick und Empfehlungen	35
5.1.4	Ökologische Bewertung	35
5.1.5	Ökonomische Bewertung	36
5.2	Zerkleinerung	36
5.2.1	Zielsetzung und Ergebnisse	36
5.2.2	Ökologische Bewertung	37
5.2.3	Ökonomische Bewertung	38
5.3	Pelletierung	38
5.3.1	Zielsetzung und Ergebnisse	38
5.3.2	Ökologische Bewertung	40
5.3.3	Ökonomische Bewertung	41
5.4	Lagerung	41
5.4.1	Ökologische Bewertung	41
5.4.2	Ökonomische Bewertung	42
5.5	Logistik	42
5.5.1	Ökologische Bewertung	43
5.5.2	Ökonomische Bewertung	44
6	THERMISCHE VERWERTUNG	45
6.1	Stoffliche und thermische Verwertung Zementindustrie	45
6.1.1	Zielsetzung, Materialien und Methodik	46
6.1.2	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	51
6.1.3	Ökologische Bewertung	53
6.2	Thermische Verwertung – Wirbelschichtvergasung	54
6.2.1	Zielsetzungen, Materialien und Methodik	54
6.2.2	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	56
6.2.3	Ökologische Bewertung	57
6.3	Thermische Verwertung – Verbrennung Großanlage	60
6.3.1	Zielsetzungen, Materialien und Methodik	60
6.3.2	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	61
6.3.3	Ökologische Bewertung	65
6.4	Thermische Verwertung – Verbrennung Kleinanlage	68
6.4.1	Zielsetzung, Materialien und Methodik	68
6.4.2	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	72
6.4.3	Ökologische Bewertung	75

7	UMSETZUNGSKONZEPT	78
7.1	Umsetzungspfade und Szenarien	78
7.1.1	Stoffliche und thermische Verwertung Zementindustrie	78
7.1.2	Thermische Verwertung – Wirbelschichtvergasung	78
7.1.3	Thermische Verwertung – Verbrennung Großanlage	78
7.1.4	Thermische Verwertung – Verbrennung Kleinanlage	79
7.2	Ökonomische Bewertung	81
7.2.1	Ökonomische Bewertung Bereitstellungswege	81
7.2.2	Ökonomische Bewertung Zementindustrie	83
7.3	Ökologische Bewertung Bereitstellungswege	89
7.3.1	Bereitstellung Schilf- Häckselgut – Verbrennung Großanlage	89
7.3.2	Bereitstellung Schilfpellets – Verbrennung Kleinanlage	90
8	ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	92
9	AUSBLICK UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN	94
10	LITERATURVERZEICHNIS	96
11	ANHANG	102
12	KONTAKTDATEN	104

1 AUFGABENSTELLUNG, SCHWERPUNKTE, METHODIK UND EINORDNUNG IN DAS PROGRAMM

1.1 Aufgabenstellung

Der Schilfgürtel des Neusiedlersees bildet mit rund 10.000 ha auf Österreichischem und 8.000 ha auf Ungarischem Staatsgebiet die größte geschlossene Schilfdecke Mitteleuropas. Die Schilfvorkommen werden zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur zu einem geringen Anteil für die Baustoffproduktion genutzt. Die Nutzung beschränkt sich dabei vor allem auf Jungschilfbestände (Pflanzenalter <3 Jahre), wobei Altschilfbestände zum jetzigen Zeitpunkt kaum genutzt werden. Die Ernteflächen beschränken sich größtenteils auf ufernahe Zonen, welche für die Erntegeräte einfacher zugänglich sind und eine ökonomische Ernte ermöglichen.

Jahrzehntlang wurde der Schilfgürtel durch kontrollierten Abbrand vom Altbestand an Schilf befreit. Nach dem Verbot des Verbrennens biogener Materialien außerhalb von Anlagen (Verbrennungsverbotsgesetz, 1993) sind neue Lösungswege zur Altschilfentsorgung zwingend erforderlich.

Aus ökologischer Sicht ist eine Intensivierung einer nachhaltigen Bewirtschaftung mit Fokus auf die Biodiversität des sensiblen Gebiets erwünscht. Großes Interesse an einer energetischen Nutzung des Altschilf- Bestandes am Neusiedlersee besteht sowohl seitens der Grundstückseigentümer, der Naturschutzbehörde als auch seitens Industrie- und Gewerbebetrieben im Nahbereich des Sees. Um diese Interessen zu bündeln sind die entsprechenden Unternehmen bzw. Organisationen als interne bzw. externe Projektpartner in das Projekt eingebunden.

Für die regionale energiewirtschaftliche Situation kann die Erschließung der Schilfressourcen durchaus als relevant bezeichnet werden. Das Ziel des Forschungsvorhabens deckt sich mit den Zielen des Nationalen Biomasseaktionsplanes (Biomasseaktionsplan, 2006), nämlich der Erschließung bisher nicht genutzter biogener Energiequellen, sowie dem regionalen Interesse einer ökologisch nachhaltigen Schilfbewirtschaftung und des Aufbaus einer energieautarken Energiemodellregion im Burgenland.

Das Projekt ENEREED sieht sich als konsequente Fortsetzung bisher auf dem Gebiet der Schilfverwertung geleisteter Vorprojekte und verfolgt eine Bündelung der mit diesem Themenbereich befassten Akteure; Forschungsinstitute, ein Technisches Büro, das Amt der Burgenländischen Landesregierung, ein Schilflieferant, ein Grundeigentümer, ein Industriebetrieb und ein Wärmeversorger sind in die Forschungsarbeiten eingebunden. Das Projektkonsortium ist in Abbildung 1-1 ersichtlich.

Neue Energien 2020 - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 1-1: Projektkonsortium ENEREED

1.2 Schwerpunkte

Ziel des Projektes ENEREED - Sustainable Energy Conversion from Reed - ist es, Möglichkeiten zur energetischen Nutzung von Altschilfbeständen am Neusiedlersee zu untersuchen und Technologien zu deren künftigen Nutzung voranzutreiben. Die betrachteten Verwertungswege umfassen die Bereitstellungskette begonnen bei der Erntetechnik, über die Verarbeitung (Zerkleinerung, Pelletierung) bis hin zur thermischen Verwertung in unterschiedlichen Anlagentechnologien, begonnen bei Kleinkesselanlagen (Hackgut-/Pelletskessel), Verwertung in mittelgroßen Kesselanlagen (Nahwärmeversorgung), Wirbelschichtvergasung sowie der Einsatz als alternativer Brennstoff in der Zementindustrie (siehe Abbildung 1-2).

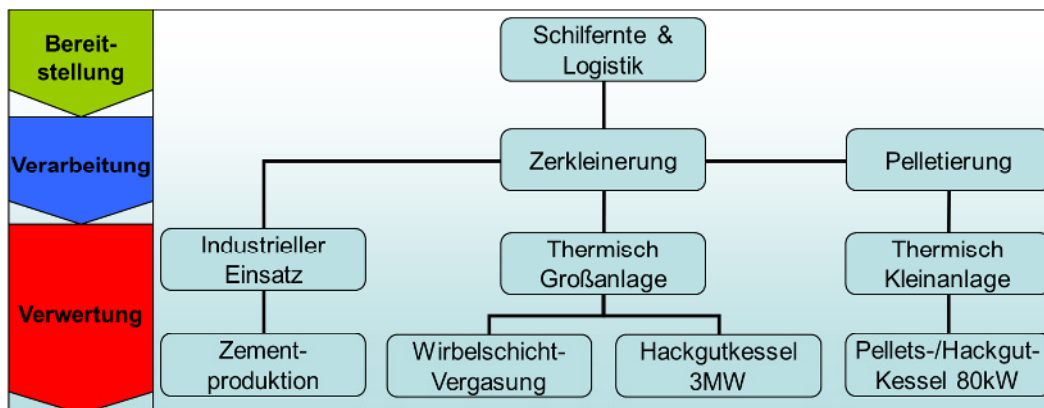


Abbildung 1-2: Untersuchte Verwertungswege

Die Einzelziele des Projekts werden wie folgt definiert:

- Recherche und Zusammenfassung bisheriger Forschungsarbeiten zum Thema energetische Schilfnutzung und Nutzung halmgutartiger Energieträger
- Optimierung von Ernte, Verarbeitung und Transportlogistik
- Analyse von Verwertungsmöglichkeiten
- Durchführung von Versuchsreihen zur energetischen Nutzung in unterschiedlichen Prozessen
- Monitoring der Versuchsreihen und Auswertung der Ergebnisse
- Evaluierung nach ökologischen, ökonomischen und technischen Kriterien (gesamtheitliche Betrachtung möglicher Verwertungsketten)
- Erarbeitung eines Umsetzungskonzeptes zur künftigen Nutzung von Schilf zur Energieerzeugung unter Berücksichtigung aller evaluierter Alternativen

1.3 Methodik

Die Methodik zur Untersuchung der Projektinhalte beruht darauf, durch Nutzung von vorhandener Infrastruktur, thermische Verwertungswege für den Rohstoff Schilf zu untersuchen, wobei die Notwendigkeit der Anpassung von Prozessparametern und baulicher Anlagenoptimierung gegeben ist. Die unterschiedlichen Verwertungswege werden in einer ganzheitlichen Bewertung verglichen und kritische Faktoren bzw. die erforderlichen Rahmenbedingungen aufgearbeitet.

Der Forschungsakt besteht in der Durchführung umfangreicher Versuchsreihen im Technikum des Projektkoordinators Fachhochschule Burgenland GmbH (Brennstoffaufbereitung, Pelletierung, Verbrennung in Kleinfeuerungsanlagen), des Projektpartners Technische Universität Wien (Brennstoffanalysen, Vergasung in einer Modellanlage), in bestehenden Heizwerken (Verbrennung in Großanlagen) und in bestehenden industriellen Produktionsprozessen (Einsatz als alternativer Brennstoff in der Zementproduktion). Ernteversuche werden im Schilfgürtel des Neusiedlersees durchgeführt und wissenschaftlich begleitet. Abbildung 1-3 zeigt die drei Phasen des Projekts.

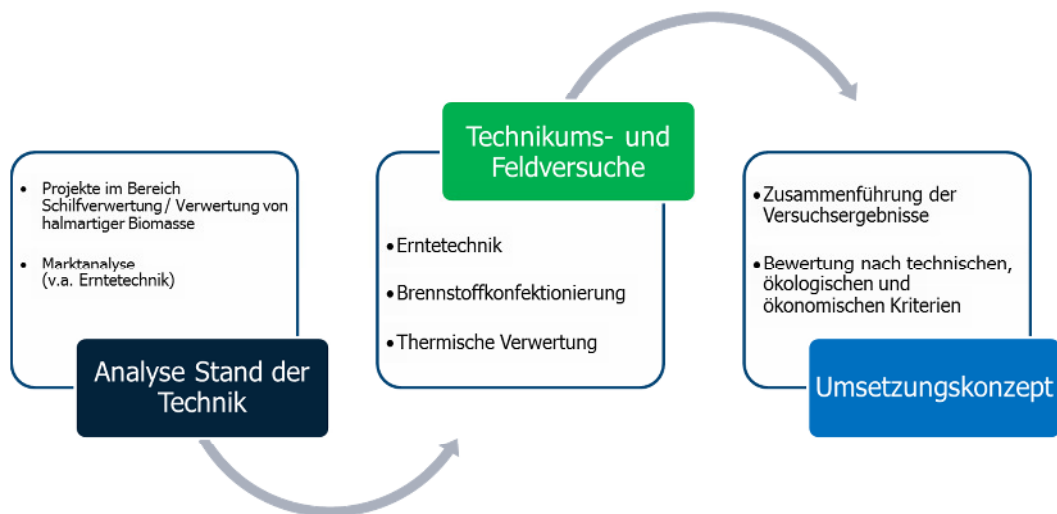


Abbildung 1-3: Projektphasen

Zur Evaluierung der unterschiedlichen Verwertungswege wird eine ökologische und ökonomische Bewertung durchgeführt.

1.4 Einordnung in das Programm

Das Projekt adressiert innerhalb der Programmlinie Neuen Energien 2020 (2. Ausschreibung) die folgenden Themenbereiche:

- Energie in Industrie und Gewerbe: Neue Produktionsverfahren und Technologien; Low CO₂-Branchenlösungen
- Fortgeschrittene Speicherkonzepte und Umwandlungstechnologien mit besonderem Augenmerk auf Schlüsseltechnologien: Biomassefeuerungen
- Klima- und Energiemodellregionen: Bezogen auf die Ebene regionaler energiewirtschaftlicher Strukturen; Voruntersuchungen oder Vorbereitung von Klima- und Energiemodellregionen

2 RAHMENBEDINGUNGEN UND NATURSCHUTZRECHTLICHE VORAUSSETZUNGEN FÜR DIE SCHILFERNTE

2.1 Ausbreitung und Flächenertrag Schilfgürtel

Der Schilfgürtel des Neusiedler Sees bildet den zweitgrößten zusammenhängenden Schilfbestand Europas, lediglich jener des Donaudeltas ist größer. Der Schilfgürtel des Neusiedlersees hat sich in seiner heutigen Form ab der Mitte des 19. Jahrhunderts ausgebildet (siehe Abbildung 2-1) und beläuft sich heute auf etwa 178 Quadratkilometer und bedeckt somit mehr als die Hälfte der Seefläche. Das Schilfwachstum wurde durch Niedrigwasserstände nach der Regulierung durch den Einserkanal und Nährstoffeintrag aus der Landwirtschaft und den umliegenden Ortschaften wesentlich gefördert. (Pfaller, 2009)

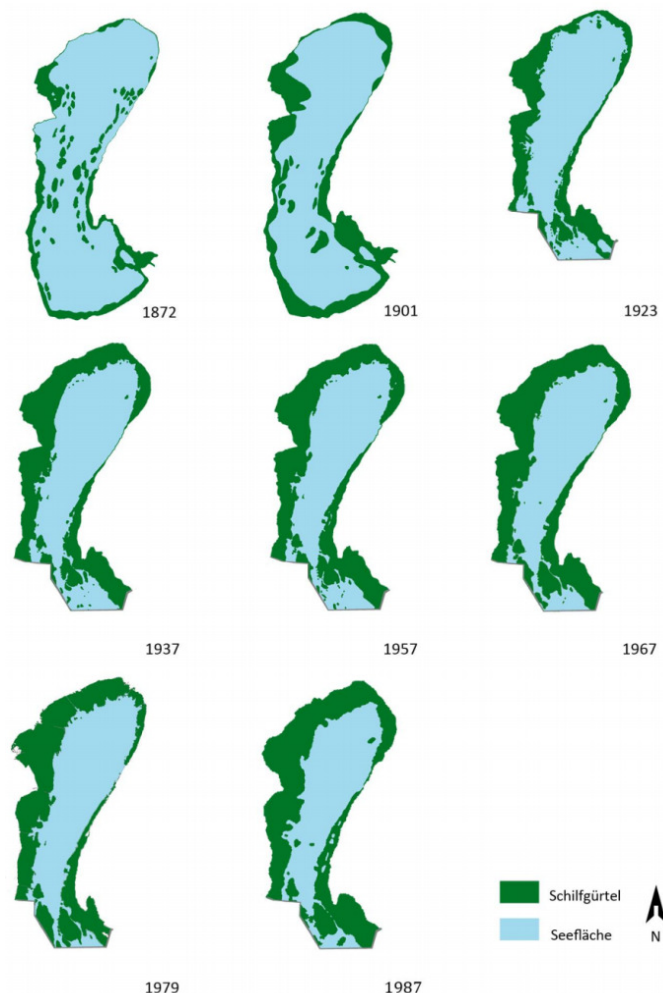


Abbildung 2-1: Ausdehnung Schilfgürtel in den Jahren 1872 – 1987 (Führer, 2010)

Das Rohstoffpotenzial auf Österreichischem Staatsgebiet am West- und Nordufer des Neusiedlersee-Schilfgürtels wurde im Rahmen einer Studie von Gamauf (2000) erhoben. Die Abschätzung erfolgt anhand von Satellitenbild- Auswertungen und morphologischen Erhebungen. Der Schilfgürtel wurde zwischen Mörbisch und Podersdorf in insgesamt 6 Polygone unterteilt (siehe Tabelle 2-1). Innerhalb dieser Polygone wurden insgesamt 83 Schilfproben entnommen.

Tabelle 2-1: Unterteilung des Schilfgürtels in Polygone (Gamauf, 2000)

Polygon	Ausdehnung
1	Mörbisch – Rust
2	Rust – Oggau
3	Oggau – Purbach
4	Purbach – Jois
5	Jois – Weiden
6	Weiden - Podersdorf

Das Schiffpotenzial wurde gemäß Tabelle 2-2 in unterschiedliche Gruppen klassifiziert:

Tabelle 2-2: Übersicht über die bei der statistischen Auswertung verwendeten Schilfklassen (Gamauf, 2000)

Schilfklasse	Charakterisierung der Klasse	Prozentanteil an Junghalmen [%]
1	Reiner Jungschilfbestand (Schnitt- / Brandfläche oder Schilfzuwachs am Rande des Schilfgürtels)	> 96%
2	Schilfbestand mit hohem Jungschilfanteil, jedoch bereits durchsetzt mit dürrerem Schilf (Altschilf)	> 50%
3	Schilfbestand mit größerem Altschilfanteil (-> abnehmende Vitalität)	< 50%
4	Hoher Altschilfanteil, stark aufgelockerter Schilfbestand – durchsetzt mit offenen Wasserflächen	

Für die Potenzialerhebung wurden jeweils die Klassen 1 – 3 herangezogen. Die Klasse 4 blieb bei der Potenzialerhebung unberücksichtigt, da diese Flächen für eine wirtschaftliche Nutzung nicht in Frage kommen. Zusätzlich wurden in der Potenzialerhebung die Klassen 2 + 3 zusammengefasst, da hier keine eindeutige Abgrenzung bei der Satellitenbilddauswertung möglich ist. Die Potenzialabschätzung für die unterschiedlichen Polygone sind in Tabelle 2-3 ersichtlich.

Alleine zwischen Purbach und Jois (Polygone 2, 3 und 4) beläuft sich das Biomassepotenzial auf 60.000 t. Die Probenentnahme der in Tabelle 2-3 analysierten Proben erfolgt im Mai bzw. Juni, daher bleiben Wachstumszuwächse bis zur Ernte im Winter unberücksichtigt. Der durchschnittliche Flächenertrag für Altschilf liegt bei 15,08 t/ha, wobei dieser Wert in den einzelnen Zonen zwischen 11,12 und 23,27 t/ha streut. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass es sich bei den erhobenen Werten nur um eine grobe Schätzung handelt.

Tabelle 2-3: Mengenabschätzung für die am West- und Nordufer des Neusiedlersees vorhandenen Schilfbestände der Klasse 1 und 2+3, nach (Gamauf, 2000)

		Trockengewicht im Mai [t/ha]	Fläche [ha]	Gesamtbiomasse [t]
Polygon 1	Klasse 1	4,93	25,29	124,68
	Klasse 2+3	14,01	438,39	6.141,84
Polygon 2	Klasse 1	11,32	90,36	1.022,88
	Klasse 2+3	23,27	941,40	21.906,38
Polygon 3	Klasse 1	7,35	600,39	4.412,87
	Klasse 2+3	11,88	1.773,00	21.063,24
Polygon 4	Klasse 1	5,57	164,70	917,38
	Klasse 2+3	17,14	1.189,71	20.391,63
Polygon 5	Klasse 1	10,05	173,97	1.748,39
	Klasse 2+3	11,12	478,80	5.324,26
Polygon 6	Klasse 1	-	11,25	-
	Klasse 2+3	13,06	96,21	1.256,50
Summe/Mittelwert	Klasse 1	7,84 ¹⁾	1.065,96	8.226,20
	Klasse 2+3	15,08 ¹⁾	4.917,51	76.083,85
Summe/Mittelwert	Klasse 1+2+3	11,46 ¹⁾	5.983,47	84.310,05
¹⁾ Mittelwert				

Tabelle 2-4 zeigt einen Vergleich von spezifischen Massen- und Energieerträgen unterschiedlicher Biomassearten. Die Werte für Schilf wurden dabei aus Gamauf (2000) abgeleitet. Zu den Ertragswerten für Energiepflanzen ist anzumerken, dass der zugrunde gelegte Massenanteil in dieser Publikation teilweise am oberen Ende der erzielbaren Erträge liegt und der daraus abgeleitete Bruttojahres-Brennstoffeintrag eine eher optimistische Prognose darstellt. Die tatsächlich erzielbaren Erträge können in einer breiten Bandbreite streuen. So gibt Kaltschmitt et al. (2009a) für Pappeln und Weiden einen Jahresertrag zwischen 4 – 18 t/ha, a an. Für Miscanthus wird ein Ertrag zwischen 10 – 30 t/ha, a angegeben.

Tabelle 2-4: Typische Massen- und Energieerträge in der Land- und Forstwirtschaft

	Biomasse-Festbrennstoff	Zugrunde gelegter Massenanteil ³⁾ [t/ha,a]	Mittlerer Heizwert Hu ³⁾ [MJ/kg]	Bruttojahres-Brennstoffeintrag [GJ/ha,a]	Heizöl-Äquivalent [l/ha,a]
Rückstände ¹⁾	Waldrestholz	1	15,5	15,5	431
	Getreidestroh	5	14,5	72,5	2.014
	Rapsstroh	3,5	14,5	50,8	1.410
	Landschaftspflegeheu	4	14,5	58,0	1.611
Energiepflanzen ¹⁾	Ganzpflanzengetreide (z.B. Triticale)	12	14,5	174	4.833
	Futtergräser (z.B. Rohrschwengel)	8	14,5	116	3.222
	Miscanthus (ab dem 3. Jahr)	15	14,5	217,5	6.042
	Kurzumtriebsplantagen (z.B. Pappeln und Weiden) ²⁾	12	15,5	186	5.167
Rückstände	Schilf	5 ⁴⁾	15,5 ⁵⁾	77,5	2.152

¹⁾ Daten aus (Kaltschmitt et al., 2009b)
²⁾ Dieser Brennstoff wird meist im feuchteren Zustand (45 – 55% Wassergehalt) verwertet.
³⁾ Bei Wassergehalt w = 15%
⁴⁾ Zugrunde gelegter mittlerer Biomasseertrag für Schilf (Klasse 2+3) bei einem angenommenen Ernteintervall von 3 Jahren aus (Gamauf, 2000)
⁵⁾ Mittlerer Heizwert, bezogen auf einen Wassergehalt w = 15%

2.2 Schilfbewirtschaftung

Der Schilfgürtel ist auf Österreichischem Staatsgebiet Großteils im Eigentum von Großgrundbesitzern und im Eigentum der angrenzenden Gemeinden (siehe Tabelle 2-5).

Tabelle 2-5: Besitzverhältnisse am Neusiedler See (Stand 2002) (Führer, 2010)

Grundbesitzer	Fläche [ha]	Grundbesitzer	Fläche [ha]
Esterházy Betriebe GmbH	7.369,08	Zisterzienserstift Heiligenkreuz	144,53
Mörbisch am See	1.047,98	Raaber Domkapitel	121,81
Waldbott-Bassenheim (Halbturn)	467,35	Stadtgemeinde Neusiedl am See	93,04
Freistadt Rust	368,04	Urbarialgemeinde Neusiedl am See	83,15
Agrargemeinde Jois	349,62	Großgemeinde Gols	27,02
Großgemeinde Weiden am See	177,62	Gesamtfläche	10.249,24

Die Schilfverarbeitung am Neusiedlersee war bis in die 60er Jahre des vergangenen Jahrhunderts ein Wirtschaftszweig von beachtlichem Ausmaß. Bis 1965 wurde rund 50% des Schilfgürtels stofflich verwertet. Durch die verarbeitende Industrie (Schilfmatten und Schilfplatten) wurden in der Region Neusiedlersee mehrere hundert Arbeitsplätze geschaffen. In den 70er Jahren kam es zu einem drastischen Rückgang in der Verarbeitung in Verbindung mit dem Verlust an Arbeitsplätzen (Rechberger, 2003).

Jahrzehntelang wurde der Schilfgürtel durch kontrollierten Abbrand vom Altbestand an Schilf befreit. Ziel des kontrollierten Abbrandes war es den Aufwuchs von Jungpflanzen zu fördern, die im darauf folgenden Jahr geerntet wurden und für die Baustoffproduktion eingesetzt wurden. Nach dem Verbot des Verbrennens biogener Materialien außerhalb von Anlagen (Verbrennungsverbotsgesetz, 1993) sind neue Lösungswege zur Altschilfentsorgung erforderlich. Mittlerweile gibt es hinsichtlich des Schilfabbrandes klare Richtlinien:

„Im Gegensatz zu diesen ökologisch unbedenklichen Schilfnutzungen...“ (Schilfschnitt und Beweidung, Anm. d. Verfassers) „...richtete lange Zeit das – aus wirtschaftlichen Gründen als notwendig erachtete - Abbrennen des Altschilfbestandes schwere Schäden in diesem Lebensraum vieler Kleinvogelarten an. Die gesetzliche Situation – geregelt durch die Landschaftsschutzverordnung - Neusiedler See 1962 - wurde lange Zeit als unklar empfunden und unterschiedlich interpretiert: von Seiten der Schilfwirtschaft wurde argumentiert, dass das Verbot des Abbrennens (§2), der Erlaubnis „der üblichen land- und forstwirtschaftlichen Nutzung“ (§4) widerspräche, außerdem wurden aufgrund von §6 Ausnahmen ermöglicht und auch behördlich genehmigt. In dieser als rechtsunsicher empfundenen Situation kam es in der Praxis oftmals zu Brandlegungen, die aber zunehmend verfolgt und - falls man des Verursachers habhaft werden konnte - auch strafrechtlich geahndet wurden.“ (Hubacek & Bauer, 1997)

„Eine verstärkte Kontrolle des Abbrennens des Schilfgürtels im Winter (als Vorbereitung für einen Schilfschnitt im darauffolgenden Jahr) ist erforderlich. Längerfristig ist ein Verbot anzustreben, sobald ein Nutzungsprogramm erstellt ist. In den Wintermonaten werden gelegentlich (in trockenen Wintern) sehr große Schilfflächen unkontrolliert, d.h. ohne Genehmigung, abgebrannt, wodurch es nicht nur zu Schäden an Seehäusern, sondern auch zur Vereinheitlichung der Altersstruktur im Schilfgürtel kommt.“ (Zech & Korner, 2003)

2.3 Naturschutzorientierte Bewirtschaftung

Teile des zum Nationalpark Neusiedlersee- Seewinkel gehörenden Schilfgürtels sind als Bewahrungszone bzw. Naturzone ausgewiesen (siehe Abbildung 2-2). In den als Naturzonen ausgewiesenen Gebieten findet keine Nutzung statt, die Bewahrungszonen sind größtenteils Naturlandschaft und von landschafts-pflegerischen Maßnahmen abhängig (Nationalpark Neusieder See - Seewinkel (Hrsg.), 2009).

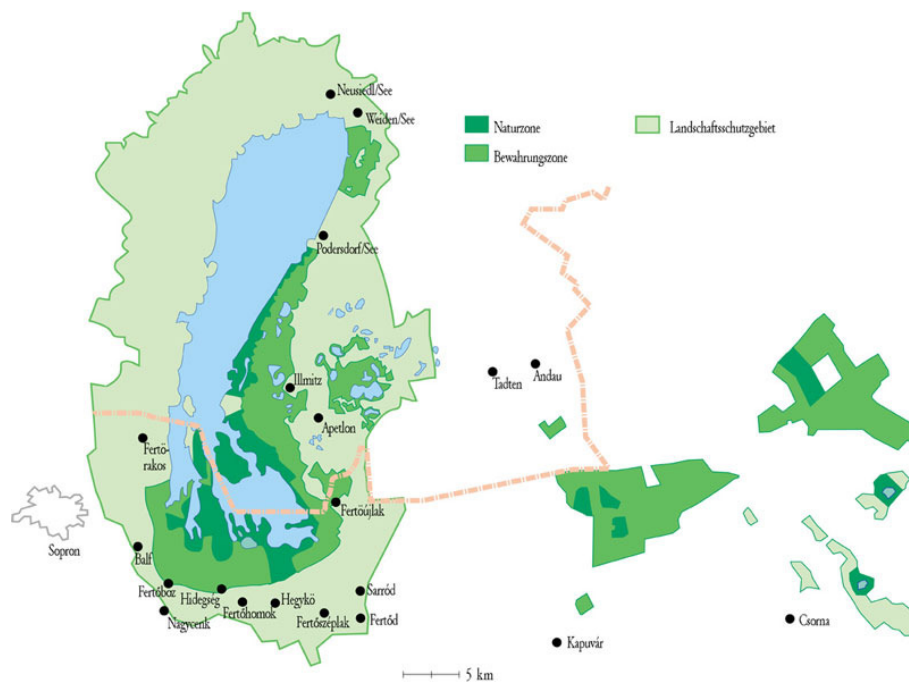


Abbildung 2-2: Nationalpark Neusiedlersee- Seewinkel (Nationalpark Neusieder See - Seewinkel (Hrsg.), 2009)

Der Schilfschnitt am Neusiedlersee erfolgt derzeit durch Klein- und Mittelbetriebe, die ausschließlich Qualitätsschilf ernten. In den Betrieben sind für die Ernte und Verarbeitung zwischen 70 und 150 Personen (teilweise Saisonarbeiter) beschäftigt. Die regelmäßig bewirtschaftete Fläche umfasst 10 – 15% des Schilfgürtels am Neusiedlersee (Rechberger, 2003).

Im Zeitraum von 15. Juli bis 15. März bedarf der landwirtschaftliche oder gewerbliche Schilfschnitt gemäß dem Burgenländischen Landschaftspflegegesetz (1990) keiner Bewilligung. Der tatsächliche Erntezeitraum für die Qualitätsschilfernte beginnt auf Grund des Feuchtigkeitsgehalts im Schilf nach dem ersten Frost im Spätherbst bzw. Anfang Winter. Pro Ernteperiode kann von 50 bis 70 Erntetagen ausgegangen werden, wobei dies auf Grund von Witterungsverhältnissen stark variieren können (Rechberger, 2003).

Aus ökologischer Sicht wird auf die Notwendigkeit der Schilfbewirtschaftung hingewiesen:

„Der Schilfschnitt als traditionelle Wirtschaftsform in der Region steht nicht zur Diskussion; er wird aus ökologischen Gründen um den Lebensraum bestimmter Vögel, aber auch Fische und Kleintierarten (Insekten, Schnecken, Spinnen...) zu „pflegen“ als notwendig erachtet. Eben aus diesem Grund lässt der Nationalpark seine Flächen des Schilfgürtels auch bewirtschaften.“ (Hubacek & Bauer, 1997)

Die Schilfbewirtschaftung ist aus Naturschutz-Sicht ein vorrangiges Ziel zur Erhaltung des Lebensraumes und der Artenvielfalt am Neusiedlersee. Der grenzüberschreitende Verein Welterbe Neusiedlersee hat sich die Erhaltung der Region des Neusiedlersees und seiner typischen Kulturlandschaft als Ziel gesetzt. Im Rahmen eines Managementplanes wurden Richtlinien für die Erhaltung und zukünftige Bewirtschaftung des Schilfgürtels am Neusiedlersee erarbeitet:

„Durch die fehlende Nutzung der jährlich neu produzierten Biomasse kommt es zu einer allmählichen Verlandung der Flachwasserzonen. Derzeit wird nur junges Schilf (einjährig) ökonomisch sinnvoll für Schilfdächer (auch Export) genutzt, eine ausgedehntere Nutzung (bis zu 6.000 ha pro Jahr) ist derzeit

nicht möglich. Bessere Umsetzungsmöglichkeiten für diese Nutzungsideen ergeben sich, wenn die Landesregierung langfristig große Flächen pachtet, da sonst nur kurzfristige Interessen dominieren. Je mehr sich Altschilf und abgelagerte Biomasse am Standort anhäufen, desto schwieriger wird die Nutzung (Gewinnung der Biomasse). Die thermische Verwertung des Altschilfs ist im Interesse von Naturschutz, Landwirtschaft und Gewässerpflege und kann zu einer höheren Wertschöpfung im Land führen (Fernwärme für Siedlungen oder Glashäuser). Die stoffliche Nutzung sollte aber nicht vernachlässigt werden – Dächer, Dämmmaterial, etc. Es stellt sich auch die Frage nach der Nutzbarkeit von Grünschilf.“ (Zech & Korner, 2003)

Hinsichtlich einer zukünftigen Umsetzung der Schilfbewirtschaftung wird die Errichtung eines Schilfclusters angestrebt:

„Die bisher fast brachliegende Nutzung der jährlich nachwachsenden Biomasse sollte durch Forschungsaktivitäten zur innovativen Verwendung von Schilf und Stroh (Dämmstoffe, Einstreu für die Tierhaltung, Verspritzung, Biomasseanlage etc.) als Ergänzung zur bisher geplanten Verbrennung (Kleinkraftwerke) verstärkt werden. Bisherige Versuche verliefen vielversprechend, es braucht jedoch eine Initiative des Landes, um vom Prototyp zur Serienproduktion zu gelangen (analog Biomassezentrum Güssing).“ (Zech & Korner, 2003)

Das tatsächliche aus Naturschutzsicht verwertbare Potenzial soll in einem Projekt (Naturschutzkonformes Managementmodell für den Schilfgürtel des Neusiedler Sees) des WWF Österreich mit BirdLife Österreich in Kooperation mit den Esterhazy- Betrieben GmbH erhoben werden.

„ ... Der gesamte Schilfgürtel des Neusiedler Sees ist als Natura 2000 Gebiet ausgewiesen, daher besteht für das Land Burgenland die Verpflichtung zur Erhaltung der hier vorkommenden und in den Anhängen der EU-Naturschutzrichtlinien angeführten Arten und Lebensräume. Unverzichtbare Voraussetzung für die Erreichung dieser Naturschutzziele ist die Erstellung eines Managementplans.

.... Die derzeitige, aus Naturschutzsicht nicht geregelte Schilfwirtschaft leistet somit keinen Beitrag zur Erreichung der Naturschutzziele, obwohl gerade in einem überlegten Einsatz der Bewirtschaftungsinstrumente Mahd und Feuer ein hohes Potential stecken würde. Der unkontrollierte (bzw. häufig außer Kontrolle geratene) Feuereinsatz kompromittiert zudem auch die Schutzziele in der Naturzone, deren Eingriffsfreiheit wegen ausufernder Brände nicht mehr gewährleistet ist. Insgesamt ist man derzeit von einem ausgewogenen, die unterschiedlichen Naturschutzzielsetzungen berücksichtigenden Management des zweitgrößten Schilfbestands Europas noch weit entfernt.

Vor diesem Hintergrund zielt der vorliegende Projektvorschlag darauf ab, einen Bewirtschaftungs- und Pflegeplan für den Schilfgürtel des Neusiedler Sees zu entwickeln, der übergeordnete Naturschutzziele sowie Interessen der Schilfwirtschaft und der Grundeigentümer wirkungsvoll miteinander verknüpft. Ergebnis des Projekts soll ein akkordierter Plan hinsichtlich der räumlichen Zonierung, der zeitlichen Staffelung und der praktischen Durchführung von Bewirtschaftungs- und Pflegemaßnahmen im Neusiedler See- Schilfgürtel sein.“ (Kohler et al., 2008)

3 BRENNSTOFFTECHNISCHE EIGENSCHAFTEN VON SCHILF

3.1 Schilfpflanze

Schilf oder auch Schilfrohr (*Phragmites communis*), ist ein Süßgras, das hauptsächlich im Uferbereich stehender oder langsam fließender, seichter Gewässer vorkommt. (Pfaller, 2009)

Folgende Bezeichnungen sind für Schilf im deutsch- und englischsprachigen Raum üblich (Hiss Reet (Hrsg.), 2009):

- Deutschsprachige Bezeichnungen: Schilfrohr, Rohr, Schilf, Teichschilf, gemeines Teichrohr, Reth, Ried, Reith, Ret, Rädje
- Englischsprachige Bezeichnungen: reed, reede common, common reed, cane, sedge, bog-reed

Der wissenschaftliche Name von Schilf lautet *Phragmites*, das in drei Untergruppen unterteilt wird (Hiss Reet (Hrsg.), 2009):

- *Phragmites communis* Trin
- *Phragmites australis*
- *Phragmites vulgaris*

Die Schilfpflanze besteht aus einem Rhizom (Wurzelgeflecht), dem Unterwasserhalm und dem Überwasserhalm.

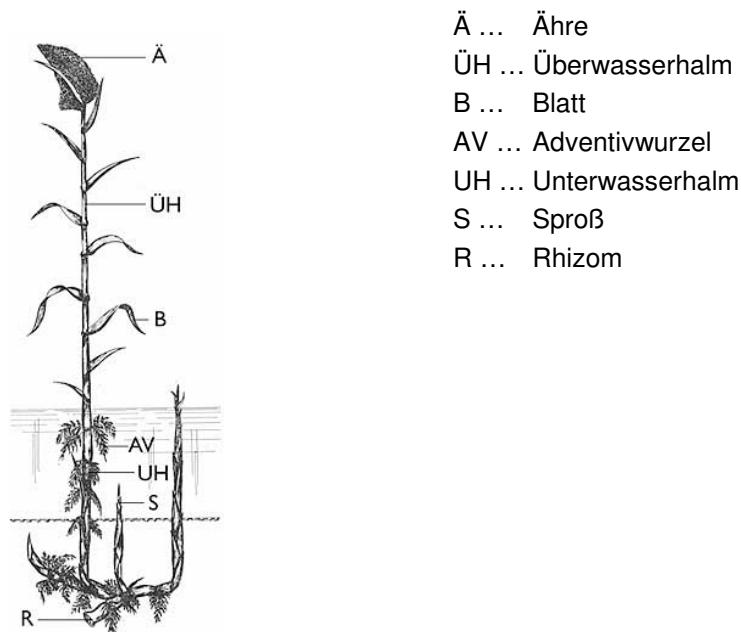


Abbildung 3-1: Aufbau der Schilfpflanze (Hiss Reet (Hrsg.), 2009)

Die Vermehrung der Schilfpflanze erfolgt durch bis zu 20 Meter lange Ausläufer, sodass weite Schilfbestände aus einer einzigen Pflanze entstehen können und sich zu einem mehrere Kilometer breiten Schilfgürtel ausbilden können. Ohne entsprechende Gegenmaßnahmen trägt das Schilfwachstum zur Verlandung des Gewässers bei. (Pfaller, 2009)

Schilf ist eine der am weitest verbreiteten Pflanzen der Welt, bevölkert Binnengewässer verschiedenster Art und ist in allen 5 Erdteilen zu finden. Weltweit sind Schilfbestände von ca. 10.000.000 ha, davon ca. 300.000 ha in Europa, zu finden (Rodewald-Rudescu, 1974).

Tabelle 3-1 zeigt eine Auflistung von weltweiten Schilfbeständen und deren Biomassepotenzial. Rodewald-Rudescu (1974) gibt für die ehemalige Sowjetunion ein Produktionspotenzial an, Gamauf (2000) hingegen den Gesamtbiomasse- Bestand am Neusiedlersee. Der Gesamtbiomasse- Bestand unterscheidet sich vom Produktionspotenzial dahingehend, dass dieser bei nachhaltiger Bewirtschaftung infolge der erforderlichen Umtriebszeit im Zuge einer Ernteperiode nicht vollständig abgeerntet werden kann.

Tabelle 3-1: Weltweite Ausdehnung von Schilfbeständen

Areal	Fläche [ha]	Potenzial [Tsd. t]	Literaturquelle
ehem. Sowjetunion	5.500.000	25.000 – 30.000 ¹⁾	(Rodewald-Rudescu, 1974)
China	854.000	2.560 ²⁾	(Gamauf, 2000)
Donaudelta	200.000		(Rodewald-Rudescu, 1974)
Mesopotamien	100.000		(Rodewald-Rudescu, 1974)
Polen	60.000		(Rodewald-Rudescu, 1974)
Ostpakistan	40.000		(Rodewald-Rudescu, 1974)
Nordkorea	30.000		(Rodewald-Rudescu, 1974)
Südkorea	20.000		(Rodewald-Rudescu, 1974)
Ungarn	26.200		(Rodewald-Rudescu, 1974)
Österreich – Neusiedlersee	15.000		(Rodewald-Rudescu, 1974)
Österreich – Neusiedlersee	6.000	36,0 ³⁾	(Brunner, 2008)
Österreich – Neusiedlersee (West + Nordufer)	5.983	84,3 ⁴⁾	(Gamauf, 2000)
¹⁾ Produktionspotenzial ²⁾ geerntete Schilfmenge (1995) – größtenteils für die Papierproduktion ³⁾ Bringbares Potenzial pro Jahr ⁴⁾ Gesamtbiomasse			

Für das Wachstum von Schilf müssen drei wesentliche klimatische Bedingungen erfüllt werden (Hiss Reet (Hrsg.), 2009):

- Anhaltende Wasserzufuhr
- Regelmäßige Unterbrechung des Wachstums durch Winterfrost, Trockenheit oder Überschwemmung
- Wassertiefe von maximal 2 m mit lockerem Untergrund

3.2 Brennstoffkategorisierung

Biogene Festbrennstoffe können gemäß Abbildung 3-2 kategorisiert werden. Schilf kann dabei als halmgutartige Biomasse im Bereich „Nebenprodukte und organische Abfälle“ als „Landschaftspflegeaufwuchs“ eingeordnet werden, wenn das Schilf mit dem Ziel der energetischen Verwertung geerntet wird.

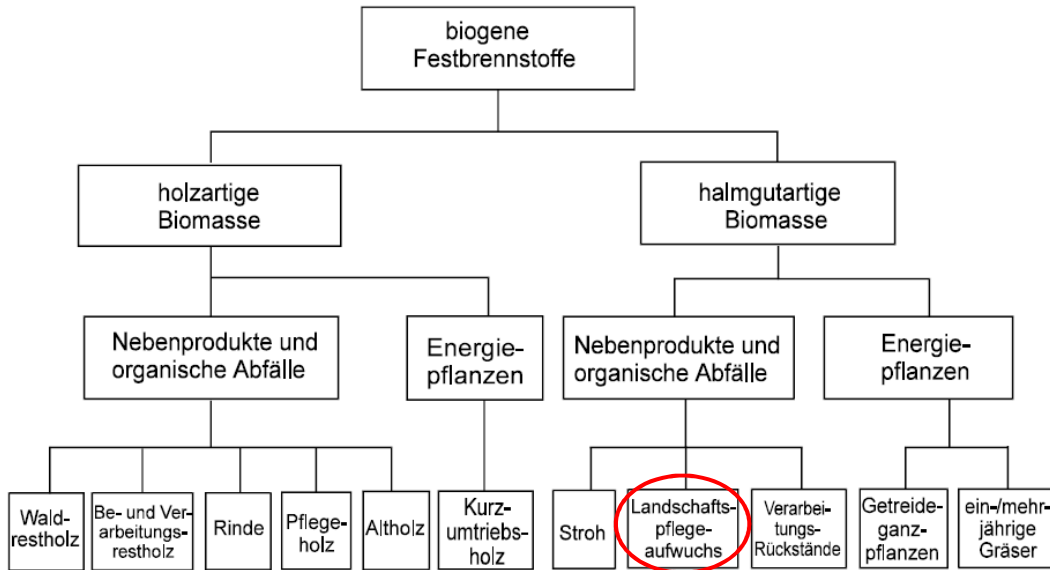


Abbildung 3-2: Systematik der biogenen Festbrennstoffe, nach (Hartmann et al., 2000)

Im Rahmen des Projekts wurde gemäß Abfallwirtschaftsgesetz (AWG, 2002) ein Feststellungsverfahren hinsichtlich des abfallrechtlichen Stellenwerts von Schilf mit dem folgenden Ergebnis in die Wege geleitet:

„Schilf ist nur dann als Abfall einzustufen, wenn der subjektive (Entledigungsabsicht) und/oder objektive Abfallbegriff (öffentliches Interesse) gemäß §2 AWG 2002 erfüllt wird. Wird Schilf für Brennstoffzwecke geerntet liegt kein Abfall vor. Erfolgt eine Schilfernte für Brennstoffzwecke sowie Produktionszwecke und wird das Schilf auf die Verwendungszwecke nur auf Grund einer Sortierung aufgeteilt liegt ebenfalls kein Abfall vor. Eine mechanische Zerkleinerung während der Produktion kann als Brennstoffvorbereitung gesehen werden und löst ebenfalls keine Abfalleigenschaft aus.“ (Grath, 2011)

Hingegen besteht eine Einstufung als Abfall in den folgenden Fällen:

„Fällt das Schilf im Rahmen der Produktion als Ausschuss an liegt Abfall vor, insbesondere wenn eine chemische Behandlung des Schilfes im Produktionsprozess vorgesehen ist oder durch die Produktion ein Störstoffeintrag (z.B. Eisenteile, Kunststoffreste) erfolgt.

Abfall liegt auch dann vor, wenn das Schilf aus anderen Gründen (z.B. Schilfschnitt zur Flächengewinnung) geschnitten wird, welche nichts mit den stofflichen oder energetischen Eigenschaften des Schilfes zu tun haben.“ (Grath, 2011)

Für eine energetische Verwertung von Schilf gilt folgende Rechtsmeinung:

„Die Abfallverbrennungsverordnung-AVV ist gemäß §2 Abs.2 Zif 1a aus fachlicher Sicht nicht auf reine Schilf- oder Biomasseverbrennungsanlagen anzuwenden. Schilf gilt als Biomasse und nur bei Mischfeuerung mit anderen Abfällen ist die AVV anzuwenden und es gelten die Emissionsgrenzwerte für

Mitverbrennungsanlagen, Zementerzeugung oder Feuerungsanlagen der AVV. Werden keine sonstigen Abfälle eingesetzt sind für die Emissionsgrenzwerte, die Anlagenausstattung und den Anlagenbetrieb die Bestimmungen der Zementverordnung 2007, Feuerungsanlagenverordnung oder Emissionsschutzgesetz für Kesselanlagen je nach Einsatzgebiet anzuwenden.“ (Grath, 2011)

3.3 Brennstoffeigenschaften

Halmgutartige Biomasse, wie Schilf, unterscheidet sich deutlich von holzartiger Biomasse, was für den Einsatz im jeweiligen Prozess zu berücksichtigen ist. Dazu bestehen auch innerhalb der Gruppe von halmgutartigen Biomassen zum Teil deutliche Unterschiede hinsichtlich der für eine Verbrennung wichtigen Eigenschaften. Wesentliche Qualitätskriterien für halmgutartige Biomasse bei der Verbrennung sind (Wichmann & Wichmann, 2009):

- Heizwert
- Feuchte-/Wassergehalt
- Anteil problematischer Inhaltsstoffe (Cl, S, N, Si)
- Aschegehalt und Ascheschmelzpunkt
- Aufbereitungsform der Biomasse
- Bewirtschaftungsfähigkeit der Bestände

Zu den typischen Eigenschaften von halmgutartigen Brennstoffen zählen die niedrige Energiedichte (in loser oder Ballenform), ein hoher Aschegehalt und meist niedrige Aschenerweichungstemperaturen. Ebenso unterscheiden sich halmgutartige Brennstoffe sehr oft im Elementargehalt (kritisch sind dabei vor allem: Cl, N, S, K, Schwermetalle) von holzartigen Brennstoffen. Problematische Inhaltsstoffe können zu schnellerem Verschleiß der Aufbereitungs- und Verbrennungsanlage, zu Prozessbeeinflussungen wie auch zu kritischen Emissionen führen. Hier ist zu erwähnen, dass ihr Gehalt in der Biomasse stark von den Standortbedingungen, wie z. B. Trophie, Hydrologie oder Salzgehalt und der Bewirtschaftung (Düngung, Erntezeitpunkt) abhängt.

Für halmgutartige Biomasse ist eine Feuchte von $\leq 15\%$ anzustreben, allerdings kann in Ausnahmefällen die gewünschte Feuchte der halmgutartigen Brennstoffe in Abhängigkeit von der Feuchte des übrigen Brennstoffmix auch über diesem Wert liegen. Zu beachten ist jedoch, dass sich mit zunehmendem Wassergehalt sowohl der Heizwert als auch die Lagerfähigkeit verringert.

Zur Ermittlung der brennstofftechnischen Eigenschaften von Schilf wurde ein Brennstoffanalyseplan ausgearbeitet, anhand dessen eine quantitative Beurteilung und ein qualitativer Vergleich von Schilf zu vergleichbaren biogenen Brennstoffen erfolgen können. Die Schilfproben wurden dabei am westseitigen Seeufer, in jenen Bereichen die grundsätzlich für die Ernte von Energieschilf zur Verfügung stehen, gezogen (siehe Tabelle 3-2).

Tabelle 3-2: Orte der Probenahme

	Schilfgürtel landseitig	Schilfgürtel seeseitig
Zone Nord (Weiden – Purbach)	(1) Breitenbrunn Seezufahrt Anfang	(2) Breitenbrunn Seezufahrt Ende (3) Purbach Seezufahrt Ende
Zone Mitte (Purbach – Oggau)	(4) Donnerskirchen Wulka- Mündung (5) Oggau Seezufahrt Anfang	
Zone Süd (Oggau – Mörbisch)	(6) Rust Seezufahrt Anfang	(7) Rust Seezufahrt Ende

Neben der Elementaranalyse wurden der Aschegehalt, die flüchtigen Bestandteile, der Heizwert sowie eine Analyse der Schmelzeigenschaften der Asche durchgeführt (siehe Tabelle 3-3).

Tabelle 3-3: Brennstoffeigenschaften von Schilf und qualitativer Vergleich zu weiteren biogenen Brennstoffen (Krail, 2013)

	Schilf ¹	Holzbrennstoffe mit Rinde ³	Stroh ³	Getreide Ganzpflanzen ³	Körner ³	Gräser ³
Elementaranalyse (Bezugsbasis Trockenmasse)						
C- Gehalt [%]	45,48 [7]	↑↑ [113]	↔ [128]	↓ [60]	↓↓ [65]	↔ [128]
H- Gehalt [%]	5,84 [7]	↑↑ [76]	↑ [112]	↑↑ [57]	↑↑ [55]	↑↑ [158]
O- Gehalt ² [%]	40,52 [7]	↑ [-]	↓ [-]	↑↑ [-]	↑↑ [-]	↓↓ [-]
N- Gehalt [%]	0,47 [7]	↓↓ [133]	↓ [146]	↑↑ [66]	↑↑ [94]	↑ [204]
S- Gehalt [%]	0,07 [7]	↓ [119]	↑ [141]	↑↑ [62]	↑↑ [66]	↑↑ [173]
Cl- Gehalt [%]	0,15 [7]	↓↓ [122]	↑↑ [116]	↓ [56]	↓↓ [55]	↑↑ [116]
Kurzanalyse (Bezugsbasis Trockenmasse)						
Aschegehalt [%]	7,47 [7]	↓↓ [120]	↓ [145]	↓↓ [67]	↓↓ [64]	↓ [201]
Flüchtige Bestandteile [%]	76,98 [7]	↑ [86]	↓ [76]	↔ [52]	↑↑ [49]	↓↓ [159]
Heizwert H _{u,p,wf} [MJ/kg]	16,38 [7]	↑↑ [115]	↓↓ [126]	↓↓ [58]	↓↓ [68]	↓↓ [218]
Ascheanalyse						
Sinterbeginn [°C]	1409 [7]	↓↓ [29]	↓↓ [48]	↓↓ [19]	↓↓ [13]	↓↓ [50]
Erweichungspunkt [°C]	>1500 [7]	↓ [34]	↓↓ [59]	↓↓ [19]	↓↓ [14]	↓↓ [62]
↔	Wert gleich hoch dem Referenzwert (Schilf)					
↓ ↑	Wert niedriger (↓) / höher (↑) als Referenzwert (Referenzwert innerhalb typischer Schwankungsbreite)					
↓↓ ↑↑	Wert deutlich niedriger (↓↓) / deutlich höher (↑↑) als Referenzwert (Referenzwert außerhalb typischer Schwankungsbreite)					
1.	Analysen Projekt ENEREED					
2.	Sauerstoffgehalt berechnet als Residualgröße (100% minus mittlerem Gehalt an Asche, C, H, N, K)					
3.	Analysen aus (Hartmann et al., 2000)					
[###]	Anzahl der analysierten Proben					

Die Analyseergebnisse zeigen folgende signifikante Unterschiede der Brennstoffeigenschaften von Schilf im Vergleich zu sonstigen biogenen Brennstoffen:

Die schadstoffbildenden Elemente liegen bei Schilf durchwegs im höheren Bereich im Vergleich zu holzartigen Brennstoffen, wobei speziell bei Stickstoff und Chlor der Mittelwert der analysierten Schilfproben außerhalb der typischen Schwankungsbreite von Holzbrennstoffen liegt. Der Stickstoff- und Schwefel- Gehalt liegt bei Getreide- Ganzpflanzen, Körnern und Gräsern zum Teil deutlich über den Werten von Schilf. Beim Chlor- Gehalt sind unterschiedliche Trends erkennbar. So sind bei Stroh und

Gräsern deutlich höheren Chlor- Gehalte zu erwarten, hingegen ist bei Getreide- Ganzpflanzen und Körnern der Chlor- Gehalt geringer als bei Schilf.

Signifikante Unterschiede ergeben sich beim Aschegehalt und beim Ascheschmelzpunkt. Der Aschegehalt von Schilf liegt durchwegs und zum Teil auch deutlich höher als der Aschegehalt vergleichbarer Biomasse. Weiters liegen auch der Sinterbeginn und Ascheschmelzpunkt in einem deutlich höheren Bereich.

Der Heizwert liegt, speziell auf Grund des hohen Aschegehalts, niedriger im Vergleich zu Holz, jedoch höher im Vergleich zu den in diesem qualitativen Vergleich herangezogenen Biomassearten.

3.4 Einschätzung des Korrosionsrisikos bei Verbrennung von Schilf

Die Chlorbindungsform spielt für die Freisetzung und Belagsbildung bei einer thermischen Nutzung eine wichtige Rolle. Bei den komplexen Reaktionen und Phasenübergängen sind neben dem Chlor auch die Stoffgruppe der Schwermetalle und die Alkalien zu berücksichtigen. Als problematisch für die Belagsbildung soll stellvertretend das Kaliumchlorid (Schmelzpunkt: 772 °C) genannt werden. Anhand des Dampfdruckes (0,1 mbar/700 °C) wird erkennbar, dass bereits bei üblichen Feuerraumtemperaturen erhebliche Anteile in die Gasphase übergehen. Die gasförmigen Kaliumverbindungen scheiden sich dann an kalten Flächen, z.B. Wärmeübertragerflächen, deren Temperatur unterhalb der jeweiligen Schmelztemperaturen liegt, ab und erstarren (Beckmann et al., 2009).

Ein entsprechender Chloreintrag bei gleichzeitig ausreichenden Vorkommen von Alkalien und bei bestimmten Verbrennungsbedingungen kann daher zu einem verstärkten Korrosionsangriff führen.

Erhöhte Frachten an SO₂ und/oder SO₃ werden positiv gewertet. SO₂ und vor allem SO₃ wird als wirksamer Reaktionspartner gegenüber den gelösten oder auskristallisierten Chloriden angesehen, es führt zur Sulfatisierung der Spezies im Abgas und soll damit die Korrosionsrelevanz mildernd beeinflussen (Beckmann et al., 2009).

Bei Korrosion treten an der Phasengrenzfläche Reaktionen zwischen Werkstoff und Umgebung auf, wodurch die Werkstoffeigenschaften beeinträchtigt werden. Das Korrosionsrisiko wird im Wesentlichen von den Verbrennungsbedingungen, der Wandoberflächentemperatur und dem Verhältnis der Elemente Cl, S, Na und K in der Brennstoffmischung bestimmt. Eine Anreicherung an Chlor in der Nähe der Korrosionsfront kann sowohl durch die Kondensation von Alkalichloriden als auch durch die Diffusion von gasförmigen HCl erfolgen.

Für die Abschätzung des Korrosionsrisikos einer Rauchgasatmosphäre können in Abhängigkeit von den Gehalten an Cl, S und Alkalien im Brennstoff Kennzahlen gebildet werden (Bachhiesl et al., 2001).

Folgende Kennzahlen wurden gebildet:

- Korrosionskennzahl I: Schwefel / Chlor - Verhältnis
- Korrosionskennzahl II: Chlorkorrosionszahl
- Korrosionskennzahl III: Alkali-Index

3.4.1 Korrosionskennzahl I: Schwefel-Chlor-Verhältnis

Das Cl-Korrosionspotential wird nicht ausschließlich von dessen absoluter Höhe im Brennstoff bestimmt, sondern ist im entscheidenden Maß vom Verhältnis zum S-Gehalt im Rauchgas abhängig. Bei einer

Versuchsreihe mit variierenden Schwefel- und Chlorgehalten im Rauchgas wurde festgestellt, dass bei einem Stoffmengenverhältnis von Schwefel zu Chlor in der Brennstoffzusammensetzung von über 4 der Chloridanteil im Aschebelag an der Rohrwand rd. 0,1 Gew.-% beträgt. Bei diesen Chloridanteilen im Belag ist im Allgemeinen nur mit geringen Korrosionsraten zu rechnen.

$$K I = \frac{n_S}{n_{Cl}}$$

Formel 3-1

- K I... Korrosionskennzahl I (Schwefel-Chlor-Verhältnis) [-]
- n_S ... Schwefelgehalt im Brennstoff [kmol/kg_{TS}]
- n_{Cl} ... Chlorgehalt im Brennstoff [kmol/kg_{TS}]

Gemäß den Untersuchungen wird das Korrosionsrisiko des Rauchgases von einem Brennstoff bei einem S/Cl-Verhältnis von > 4 als gering, 2 < S/Cl < 4 als mittel und < 2 als hoch eingestuft.

3.4.2 Korrosionskennzahl II: Chlorkorrosionszahl

Die Mitarbeiter des National Renewable Energy Laboratory in Colorado haben in umfangreichen Untersuchungen einen funktionalen Zusammenhang zwischen dem Schwefel-, Chlor- und Alkaliengehalt im Brennstoff zu dem in Belägen an den Rohrwänden abgeschiedenem Chlor festgestellt.

Basierend auf den Laborergebnissen und auf dem Reaktionsmechanismus wurde eine Korrosionskennzahl in Abhängigkeit vom Gesamtschwefel, vom Gesamtchlor und den frei verfügbaren Alkalien im Brennstoff ermittelt. Abbildung 3-3 illustriert das Ergebnis der Untersuchung, wobei bei einem S / (2 x Max(Alkalichlorid)) > 1 nur geringe Cl-Ablagerungen festgestellt wurden.

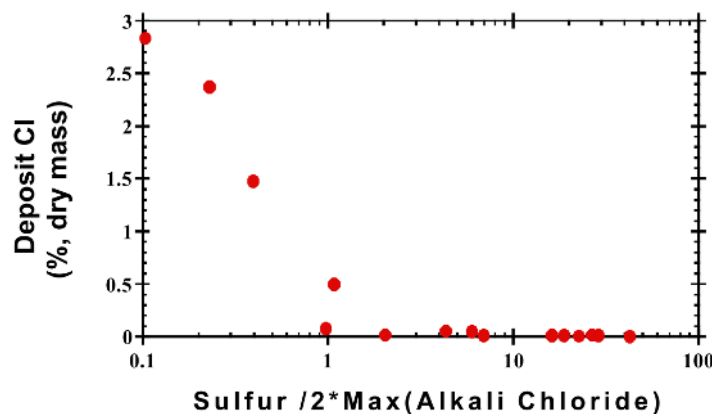


Abbildung 3-3: Chlorkonzentration im Belag als Funktion von Schwefel, Chlor- und Alkaliengehalt (Robinson et al., 1998)

Die Korrosionskennzahl II errechnet sich aus dem molaren Verhältnis von Schwefel zu den maximal möglichen, gebildeten Alkalichloriden (NaCl und KCl) und basiert auf der theoretischen Überlegung, dass die in der Asche an der Rohrwand abgelagerten Alkalichloride unter Freisetzung von Chlor sulfatisiert werden. Die Berechnung der Bildungsrate der Alkalichloride wird vom frei verfügbaren Alkalimetall und vom zur Verfügung stehenden Chlor bestimmt. Dabei kann zumindest bei Kohle davon

ausgegangen werden, dass der im Brennstoff vorhandene Kaliumanteil zu 50% und Natriumanteil zu 100% zur Bildung eines Alkalichlorids zur Verfügung steht.

Die Korrosionskennzahl II wird aus dem Stoffmengenverhältnis Schwefel zur doppelten Stoffmenge Verfügbarer Alkalichloride gebildet.

$$K II = \frac{n_S}{2 \times n_{\text{Alkalichloride}}} \quad \text{Formel 3-2}$$

- K II... Korrosionskennzahl II (Chlorkorrosionszahl) [-]
- n_S ... Schwefelgehalt im Brennstoff [kmol/kg_{TS}]
- $n_{\text{Alkalichloride}}$... Gehalt an Alkalichloriden im Brennstoff [kmol/kg_{TS}]

3.4.3 Korrosionskennzahl III: Alkali-Index

Der Alkali-Index gibt das Verhältnis an Alkalioxiden im Brennstoff zum Energieinhalt des Brennstoffes wieder.

$$K III = \frac{w_{\text{Asche}} \times (w_{\text{Na}_2\text{O},A} + w_{\text{K}_2\text{O},A})}{H_u} \quad \text{Formel 3-3}$$

- K III... Korrosionskennzahl III (Alkali-Index) [g/MJ]
- w_{Asche} ... Stoffmassenanteil im Brennstoff [-]
- $w_{\text{Na}_2\text{O},A}$... Stoffmassenanteil Na₂O in der Asche [-]
- $w_{\text{K}_2\text{O},A}$... Stoffmassenanteil K₂O in der Asche [-]
- H_u ... unterer Heizwert Trockenmasse [-]

Ein hoher Alkaliindex bedeutet ein hohes Risiko eines Korrosionsangriffes durch Kondensation von Alkalichloriden.

3.4.4 Korrosionskennzahlen für Schilf

- Korrosionskennzahl I (Schwefel-Chlor-Verhältnis):

Der Schwefelgehalt im Schilf liegt bei 0,07 m-%, der Chlorgehalt bei 0,15 m-%. Daraus ergibt sich ein Stoffmengenverhältnis und damit die Korrosionskennzahl I.

$$K I = \frac{n_S}{n_{Cl}} = \frac{\frac{w_S}{MM_S}}{\frac{w_{Cl}}{MM_{Cl}}} = \frac{\frac{0,0007}{32,065}}{\frac{0,0015}{35,453}} = 0,5 \quad \text{Formel 3-4}$$

Gemäß Korrosionskennzahl I ist das Korrosionsrisiko als hoch einzustufen.

- Korrosionskennzahl II (Chlorkorrosionszahl):

Der Massenanteil Schwefel (w_S) im Schilf wurde mit $7 \cdot 10^{-4}$, der Massenanteil Chlor (w_{Cl}) im Schilf mit $1,5 \cdot 10^{-3}$ und der Massenanteil Asche (w_{Asche}) mit $7,47 \cdot 10^{-2}$ eruiert. Die Ascheanalyse ergab für Natrium einen Massenanteil von $1,66 \cdot 10^{-2}$ als Na_2O und für Kalium einen Massenanteil von $2,72 \cdot 10^{-2}$ als K_2O berechnet. Aus diesen Analysendaten errechnen sich die in der Tabelle 3-4 angegebenen Stoffmengen für 100 g Schilf (trocken).

Tabelle 3-4: Stoffmengen der für die Korrosionskennzahl wesentlichen Elemente im trockenen Schilf

Element	Stoffmenge n [mol/100 g _{TS}]
Schwefel	$2,183 \cdot 10^{-3}$
Chlor	$4,231 \cdot 10^{-3}$
Natrium	$2,0 \cdot 10^{-3}$
Kalium	$2,15 \cdot 10^{-3}$

Aus der Erkenntnis, das verfügbares NaCl zu 100% und verfügbares Kaliumchlorid zu 50% zur Bildung von Alkalichloriden beitragen und davon ausgegangen wird, dass das gesamte Chlor entweder als Kaliumchlorid oder als Natriumchlorid vorliegt ergibt sich für die Korrosionskennziffer II folgender Wert:

$$K_{II} = \frac{2,183 \times 10^{-3}}{2 \times 3,07 \times 10^{-3}} = 0,36 \quad \text{Formel 3-5}$$

Aus diesem Wert folgt für das Vorhandensein einer Chlorablagerung eine hohe Wahrscheinlichkeit.

- Korrosionskennzahl III (Alkali-Index):

$$K_{III} = \frac{7,47 \times 10^{-2} \times (1,66 \times 10^{-2} + 2,77 \times 10^{-2})}{16,38 \times 10^{-3}} = 0,2 \left[\frac{kg}{GJ} \right] \quad \text{Formel 3-6}$$

Aus dem Wert der Kennzahl ergibt sich ein mittleres Korrosionsrisiko (Jenkins et al., 1998).

- Resümee

Die betrachteten Korrosionskennzahlen ergeben aufgrund der Brennstoffanalyse ein mittleres bis hohes Korrosionsrisiko bei der Verbrennung von Schilf. Das Korrosionsverhalten ist aber nicht nur von den Bestandteilen des Brennstoffes abhängig sondern auch von Brennstoffverhalten während des Verbrennungsprozesses. Dieses Verhalten ist einerseits von den Eigenschaften des Brennstoffs sowie von den jeweiligen Prozessbedingungen wie z.B.: Temperatur, Verfügbarkeit des Sauerstoffes, etc. abhängig. Die Prozessbedingungen haben Einfluss auf die Element-Freisetzung und damit verbunden auf für die Korrosion ausschlaggebende Rauchgaszusammensetzung. Realitätsnahe Untersuchungen, z.B.: im Batch-Reaktor sind für weitere Aussagen betreffend Korrosion notwendig (Beckmann et al., 2009).

4 METHODIK ÖKONOMISCHE- ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG

In nachfolgenden Unterkapiteln wird die Methodik zur Erstellung der ökonomischen sowie ökologischen Bewertung beschrieben. Die Ergebnisse der ökologischen bzw. ökonomischen Bewertung sind als Teil der jeweiligen Prozessbewertungen in Kapitel 5 (Erntetechnik, Verarbeitung und Logistik) und Kapitel 6 (Thermische Verwertung) zu finden. Die Zusammenfassung der bewerteten Prozessschritte und der Vergleich in unterschiedlichen Umsetzungspfaden erfolgt in Kapitel 7 (Umsetzungskonzept).

4.1 Ökonomische Bewertung

4.1.1 Ökonomische Bewertung – Teilkostenrechnung

Untersuchungsgegenstand ist die jeweilige Wertschöpfungskette von der Ernte bis zur thermischen Verwertung. Folgende Prozessabschnitte werden untersucht:

- Ernte
- Brennstoffaufbereitung (häckseln und/oder pelletieren)
- Transport (Traktor und LKW)
- Lagerung

Die Teilkostenrechnung findet Anwendung um die fixen und variablen Kosten getrennt darzustellen. Als Kostenträger werden die einzelnen Prozessabschnitte der Verwertungskette definiert. Um eine einfache Vergleichbarkeit zu gewährleisten werden alle Kosten auf Masse, 1t Schilf, bezogen angegeben. Die Abbildung 4-1 zeigt die zugrundeliegende Kostenstruktur.

Kostengliederung der Produktionsverfahren								
Direktkosten	Arbeitsleistungskosten					Gebäude und Infrastrukturkosten	Flächenkosten	Rechtekosten
	Kosten für Dienstleistungen	Kosten für Arbeitskräfte		Kosten für Arbeitsmittel				
Materielle Betriebsmittel	Lohnarbeit	Löhne Saison Arbeitskräfte	Löhne Fest-Arbeitskräfte	Betriebsstoffe	Abschreibung	Abschreibung	Pacht	Abschreibung
Immaterielle Betriebsmittel	Zinsen	Zinsen		Reparaturen	Versicherung	Unterhaltung	Grundsteuer	Zinsen
Zinsen				Miete	Steuern	Versicherung	Flurbereinigung Wasserlasten	Pacht
				Leasing	Technische Überwachung	Miete	Wege (Kanäle)	
				Zinsen	Wartung	Zinsen		
					Zinsen			

Abbildung 4-1: Darstellung der Einzelkosten (variable und fixe) – Gliederung nach Produktionsverfahren (KTBL, 2012)

Die folgende Tabelle 4-1 zeigt das Kostenmodell nachdem die Berechnung der Einzelkosten durchgeführt wurde. Das Modell wurde auf die Prozessschritte Ernte, Zerkleinern, Pelletieren, Transport und Lager (inkl. Ein- und Auslagern) angewendet.

Tabelle 4-1: Aufbau der Berechnung der Brennstoffgestehungskosten

Kosten für Arbeitsmittel (Investition)	Abschreibung (Restwert=0)
	Versicherung
	Zinsen
Kosten für Arbeitsmittel (Betrieb)	Betriebsstoffe
	Reparaturen - Verschleiß
	Gegeben falls Miete
Kosten für Arbeitskräfte	Löhne Saison AK
Gebäude und Infrastruktur	Abschreibung
	Unterhaltung
	Versicherung
	Zinsen
Flächenkosten	Pacht
	Grundsteuer

Das Modell beinhaltet die fixen und variablen Kosten. Zu den fixen Kosten zählen die Investitionskosten (Abschreibung), die Zinsen für das gebundene Kapital, Versicherungen und Instandhaltungsaufwendungen. Die variablen Kosten setzen sich aus den Aufwendungen für das Personal und Treib- und Betriebsstoffe zusammen.

Für die Flächennutzung werden keine Kosten in die Berechnung übernommen (keine Pacht auch keine Grundsteuer). Die fixen Kosten der Maschinen für die Zerkleinerung werden nicht zu 100% der Schilfnutzung zugerechnet, da sie über die verbleibende Zeit zur Zerkleinerung von Holz verwendet werden. Somit wird die Abschreibung nur für den Anteil der Jahresbetriebsstunden, die für die Schilfbearbeitung nötig ist, verrechnet. Derselbe Ansatz gilt für den Traktor, der für den Transport beim Schilfgürtel und für das Ein- und Auslagern benötigt wird. 25% seiner Jahresarbeitsstunden wird er für die Schilfbearbeitung eingesetzt, weshalb 25% der fixen Kosten zugerechnet wird.

Eine Übersicht mit der Aufstellung der Inputdaten für die Kostenberechnung ist in Tabelle 11-1 zu finden.

4.1.2 Ökonomische Bewertung – Grenzvermeidungskosten CO₂-Emissionen

Die Ermittlung von Grenzvermeidungskosten für CO_{2,fossil} erlaubt verpflichteten Teilnehmern an Emissionshandelssystemen den wirtschaftlichen Vergleich verschiedener Maßnahmen zur Emissionsreduktion bzw. den Vergleich der Kosten für intern realisierte Emissionsvermeidungen mit den Kosten für den Zukauf von Emissionsrechten (Spangardt & Meyer, 2005).

Die Grenzvermeidungskosten stellen hierbei jene zusätzlichen Kosten dar, die durch die Vermeidung jeder weiteren Tonne emittiertem CO_{2,fossil} entstehen. Es liegt dabei in der Natur der Sache, dass die

Kosten für die Vermeidung jeder zusätzlichen Tonne emittiertem $\text{CO}_{2,\text{fossil}}$ ansteigen. Da einzelne Maßnahmen sich nicht nur auf die Emissionen auswirken, sondern (z. B. bei Effizienzmaßnahmen) auch eine Verminderung des Energiebedarfs bzw. eine Änderung eines verwendeten Brennstoffs auch geänderte Brennstoffgestehungskosten (des erforderlichen Brennstoffmixes) bzw. ggf. Anlagenadaptierungen (Brennstofflogistik, ...) zur Folge haben können, ist eine umfassende Betrachtung erforderlich um eine Aussage über die betriebswirtschaftlichen Auswirkungen und die Sinnhaftigkeit der Umsetzung der jeweiligen Szenarien treffen zu können. Negative Grenzvermeidungskosten können auftreten, wenn Maßnahmen in einer Gesamtbetrachtung betriebswirtschaftliche Einsparungen zur Folge haben. Liegen die Grenzvermeidungskosten pro Tonne $\text{CO}_{2,\text{fossil}}$ für potentielle interne Maßnahmen über dem (erwarteten) Marktpreis von Emissionszertifikaten kann aus betriebswirtschaftlicher Sicht der Zukauf von Emissionsrechten sinnvoll sein.

4.2 Ökologische Bewertung

Für die ökologische Bewertung wird die Methode der Ökobilanzierung nach EN ISO 14040 (2006) und EN ISO 14044 (2006) angewendet. Für die Bewertung der einzelnen Stationen der Bereitstellungsketten wird die Bearbeitung von 1t Schilf als funktionale Einheit definiert. Werden die Umsetzungspfade (Bereitstellungsketten) als gesamtes betrachtet, dient 1MJ Output an thermischer Energie als Betrachtungseinheit. Ziel der ökologischen Bewertung ist eine vergleichende, attributive Quantifizierung ausgewählter Wirkkategorien für verschiedene Verwertungswege. Die Systemgrenzen umfassen die vorgelagerten Prozesse um technische Geräte herzustellen, genauso wie Prozesse die für die Herstellung der benötigten Infrastruktur, wie z.B. Lagerung oder Transport, benötigt werden. Allfällige Transportaufwendungen zwischen den einzelnen Teilen der Bereitstellungsketten sind inkludiert. (Rixrath, 2013)

Die LCI (life cycle inventory) Analyse (Bestandsaufnahme) hat ihren Fokus darauf, Daten aus Laborversuchen und Feldversuchen zu verwenden. Für die Prozesse Ernten, Zerkleinern und thermische Verwertung kann auf Primärdaten zurückgegriffen werden. Daten aus der Literatur werden nötig um den Transport, die Lagerung und einzelne Komponenten (Einzelteile) zu modellieren. Weiters wird auf Literaturwerte zurückgegriffen um die Biomasse- und fossilen-Referenzen für den Vergleich zu berechnen. Diese stammen aus der ecoinvent Datenbank v 2.1 (Ecoinvent, 2007). Für die Berechnung der Wirkkategorien werden die CML 2001-Nov. 2010 (Guinée (Hrsg.), 2002) und die ReCiPe 1.07 (Midpoint) (Goedkoop, et.al., 2012) Methoden herangezogen. Der Anteil an biogenen Kohlenstoff (C_{biogenic}) wird in der Berechnung nicht berücksichtigt. Dieser Wert wird für die gesamte Bereitstellungskette als neutral angesehen (vom Wachstum bis zur thermischen Verwertung).

Für die ökologische Bewertung sind die Brennstoffeigenschaften von Schilf maßgeblich, diese sind im Kapitel 3.3 dargestellt und in der Tabelle 4-2 zusammengefasst. Die Angaben zu den transportierbaren und lagerbaren Mengen sowie die Transportdistanzen sind ebenfalls von Bedeutung. Die für die Berechnung verwendeten Werte finden sich in Tabelle 4-3 und Tabelle 4-4.

Tabelle 4-2: Brennstoffeigenschaften, Daten für die ökologische Bewertung

Parameter	Einheit	Holz (Häckselgut)	Holz (Pellets)	Schilf (Häckselgut)	Schilf (Pellets)
Unterer Heizwert (trocken Masse)	[MJ/kg]	18,6	18,5	16,2	17,0
Unterer Heizwert (feuchte Masse)	[MJ/kg]	9,0	17,0	13,9	15,8
Wassergehalt	[Massen-%]	45,8	7,0	9,1	6,1
Schüttdichte	[kg/m ³]	280	650	120	650

Tabelle 4-3: Transportmengen und Lagermengen, Daten für die ökologische Bewertung

Parameter	Einheit	Rundballen	Bündel	Häckselgut	Pellets
Transport Masse Traktor	[t _{FM}]	2,7	1,9	4,0	nz ¹⁾
Transport Masse LKW	[t _{FM}]	4,2	4,8	10,0	25,0
Lagermenge - landwirtschaftliche Halle	[t _{FM}]	112	72	150	860
Lagermenge – Speziallager für Häckselgut + Pellets	[t _{FM}]	nb ²⁾	nb ²⁾	150	860

¹⁾ nz ... nicht zutreffend – Pellets werden nicht mit dem Traktor transportiert.
²⁾ nb ... nicht bestimmt – nur für Häckselgut und Pellets relevant.

Tabelle 4-4: Transportdistanzen, Daten für die ökologische Bewertung

Parameter	Einheit	Referenz	Großanlage	Kleinkessel
Transportdistanz Traktor	[km]	nb ¹⁾	3	3
Transportdistanz LKW (I)	[km]	100 ²⁾	100 ²⁾ / 50 ³⁾	100 ²⁾ / 50 ³⁾
Transportdistanz LKW (II)	[km]	150 ³⁾	150 ³⁾	150 ³⁾

¹⁾ nb ... nicht bestimmt, Transport inkludiert im verwendeten Referenzprozess aus der Literatur (ecoinvent Datenbank).
²⁾ Transportdistanzen in den Scenarios A-C bis D-C (Großanlage – Schilfhäckselgut) und Holz-Referenz (Häckselgut).
³⁾ Transportdistanzen in den Scenarios A-P bis D-P (Kleinkessel – Schilfpellets) und in Holz-Referenz (Holzpellets).

5 ERNTETECHNIK, VERARBEITUNG UND LOGISTIK

5.1 Erntetechnik

5.1.1 Zielsetzung, Materialien und Methodik

Das Arbeitspaket Brennstoffeigenschaften (des Schilfs), Bewirtschaftung, Erntetechnik und Verarbeitung beinhaltet neben der Brennstoffanalytik auch Feldversuche, Erntefahrten, und Konzepte zur Erntelogistik, wobei von vorhandenen Maschinerien und Technologien ausgegangen wurde, welche sich für die Ernte auf dem Neusiedler See für den Schnitt von Qualitätsschilf bewährt haben.

Für die ökonomische Nutzung ist die Erntegeschwindigkeit und der Personalbedarf ausschlaggebend; eine weitere wichtige Randbedingung besteht darin, dass das Endprodukt der Erntemaschine (Häcksel oder Ballen) nicht im Schwad abgelegt werden kann – damit wird auch die Breite des Schilfgürtels und die „Eindringtiefe“ in diesem ein wichtiges Kriterium. Die Ausnutzungsdauer der Erntemaschine als weiterer Parameter ist nicht nur durch die Winterernte eingeschränkt, sondern wird witterungsmäßig weiter reduziert („Verhinderungstage“). Selbstverständliche Kriterien wie die Zuverlässigkeit, die Brennstoffkosten, die Betriebskosten kommen hinzu.

Ökologisch stehen die Verhinderung von Flurschäden und die Minimierung von Emissionen in Luft, Wasser und Boden und auch letztlich das Gefährdungspotential im Vordergrund.

Die Untersuchungen beinhalteten zahlreiche Erntefahrten, die begleitet, aufgezeichnet und ausgewertet wurden, Feldversuche zur Zerkleinerung des Schilfs zu Häcksel, Transporte zum Verbraucher, Konzepte der Bereitstellung und schließlich Anforderungen für eine Erntemaschine, die den neuen Problemstellungen gerecht werden soll (eine Entwicklung einer derartigen Maschine war im Forschungsvorhaben nicht vorgesehen und erfordert einen weiteren Rahmen).

5.1.2 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

In zahlreichen Erntefahrten mit den beiden eingesetzten Erntemaschinen (Bündelerntemaschine „Paul I“ – siehe Abbildung 5-1 und Rundballenerntemaschine „Sumo-Quaxi“ – siehe Abbildung 5-2), in welchem große Schilfmengen für die Verbrennungsversuche im Zementwerk geerntet wurden, konnte die Eignung der maschinellen Ausrüstung erprobt und prinzipiell bestätigt werden. (Beckmann, 2013)

Beide Maschinen weisen als Chassis jenen von Pistenraupen auf, die Mähbalken sind als Doppelmesser ausgeführt. Die Erntemaschine „Paul I“ ist für Qualitätsschilf konzipiert, produziert Bündel und arbeitet personalintensiv, während die Erntemaschine „Sumo-Quaxi“ Rundballen produziert, den höheren Mechanisierungsgrad aufweist und für die Altschilfernte für energetische Nutzung in Frage kommt.



Abbildung 5-1: Bündelerntemaschine „Paul I“



Abbildung 5-2: Rundballenerntemaschine „Sumo-Quaxi“

Die Tabelle 5-1 und Tabelle 5-2 zeigen die Daten der in Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2 dargestellten Erntemaschinen; die Leistungsdaten der Erntemaschinen wurden z. T. unter Zuhilfenahme eines GPS-Systems und einer entsprechenden (statistischen) Auswertung ermittelt. Beide Erntemaschinen hatten bei den Erntefahrten größenordnungsmäßig die gleiche Ernteleistung (Stundenleistung: 1,25 t/h, Tagesleistung: 10 t/d). Der Flächenertrag der Rundballenerntemaschine „Sumo-Quaxi“ ist mit 6,2 t/ha etwas höher als bei der Bündelerntemaschine „Paul I“, da die erstgenannte Erntemaschine auf weniger bewirtschafteten Ernteflächen betrieben wurde.

Bei „Paul I“ ist die menschliche Arbeitskraft der limitierende Faktor, während das Prinzip der Erntemaschine „Sumo-Quaxi“ durch Optimierung und Mechanisierung verbessert werden könnte.

Tabelle 5-1: Technische Daten der eingesetzten Erntemaschinen

Technische Daten	Einheit	Paul I	Sumo-Quaxi
Typ		Bündelerntemaschine	Rundballenerntemaschine
Hersteller		Erwin Sumalowitsch, Podersdorf	
Baujahr		~2000	2004
Mannschaft	[Mann]	5	1 ... 2
Gewicht: leer/max.	[kg]	4.500 / 6.500	9.800 / 11.500
Max. Bodendruck	[kg/cm ²]	0,098	0,122
Leistung des Diesel-Motors	[kW]	118	142
Kraftstoffverbrauch	[l/h]	6,3	10,0
Mähbreite	[m]	2,85	2,85
Form des geenteten Schilfs		Bündel	Rundballen
Bündel-bzw. Ballendimension: Durchm.*Länge	[m]	~0,2 * Schilflänge	1,2 * 1,2
Speicherkapazität = Ernte pro Fahrt	[kg/Fahrt]	1.850	764

Tabelle 5-2: Gemessene Leistungsdaten der eingesetzten Erntemaschinen

Gemessene Leistungsdaten (Mittelwerte) im März 2012	Einheit	Paul I	Sumo-Quaxi
Dauer pro Fahrt (inkl. 3' Chargierzeit)	[h/Fahrt]	1,33	0,69
Ernte-Stundenleistung	[t _{FS} /h]	1,39	1,11
Ernte-Tagesleistung	[t _{FM} /d]	11,13	8,86
Flächenleistung pro Fahrt	[ha/Fahrt]	0,336	0,123
Flächenertrag	[t _{FM} /ha]	5,5	6,2
Eindringtiefe = (Länge der Fahrt)/2 aus GPS	[m]	1.130	345
Länge der Mähfahrt aus GPS	[m]	1.180	430
Mähfahrt- /Rückfahrt-Geschwindigkeit aus GPS	[km/h]	1,2 / 3,8	0,8 / 2,7
Max. Ernte-Stundenleistung rückgerechnet	[t _{FM} /h]	1,8	1,3

Aus den gemessenen Leistungsdaten können, wie die Abbildung 5-3 zeigt, die erzielbaren Ernte-Stundenleistungen in Abhängigkeit der geforderten Eindringtiefe ermittelt werden; der Abfall der Ernteleistung kommt dann zu Stande, wenn bei höheren Eindringtiefen nach der Mähfahrt eine Rückfahrt ohne Ernte erforderlich ist, um an den Ausgangspunkt zurückzukehren (siehe Abbildung 5-4). Wie ersichtlich sind beide Erntemaschinen eher für einen ufernahen Einsatz konzipiert (die Problematik des etwaigen Einsatzes eines Shuttles zwischen der erntenden Maschine und dem Ufer stellte sich daher nicht).

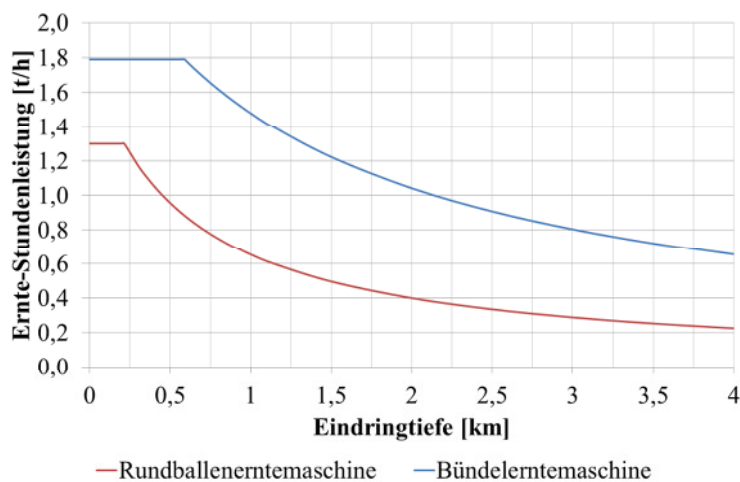


Abbildung 5-3: Ernte-Stundenleistung der Erntemaschinen als Funktion der Eindringtiefe

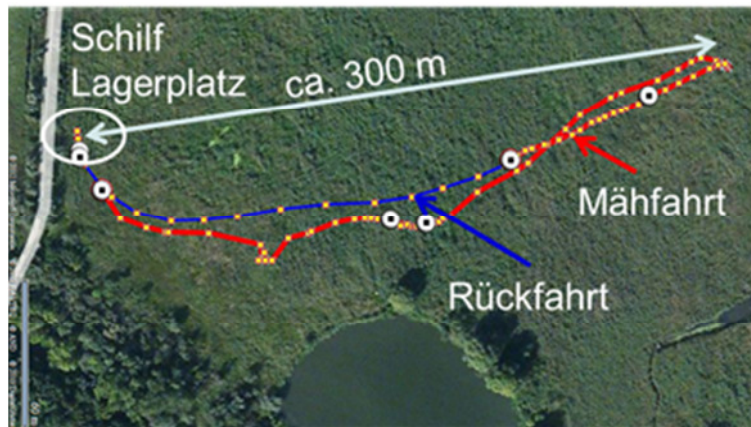


Abbildung 5-4: Ernteroute der Rundballenerntemaschine „Sumo-Quaxi“, mit einer Mähfahrt, einer kurzen Rückfahrt und einer Eindringtiefe von 300m

Aus eigenen Messungen wurden Parameter für die Speicher- und Transporteigenschaften des Schilfs erstellt. Die Tabelle 5-3 zeigt eine Gegenüberstellung dieser Parameter der verschiedenen Formen des aufbereiteten Schilfs, wobei die Rund-Ballenform (wie von der Rundballenerntemaschine „Sumo-Quaxi“ produziert) Vorteile gegenüber der lose gehäckselten Form aufweist. Die Lagerung der Rundballen, im Freien, sowie der Transport in LKW-Zügen (Ladefläche mit Schubboden oder Laderaum kippbar) wurden technisch demonstriert. Quaderballen hätten an sich noch günstigere Eigenschaften, jedoch war für die Erzeugung dieser keine kombinierte Erntemaschine verfügbar.

Tabelle 5-3: Speicherbarkeit verschiedener Ballenformen

Form des Schilfs	Einheit	Häcksel	Ballen	
			Rund	Quader
Verfahrenstechnik		Geschnitten	gewickelt	gepresst
Größe	[m]	<0.1	1,2 * 1,2	1,2 * 0,9 * 2,4
Volumen	[m ³]		1,357	2,55
Gewicht	[kg]		191	765
Dichte	[kg/m ³]	120	141	300
Gewicht pro m ³ Raum	[kg/m ³]	120	128	300
Stapelbarkeit		Haufen	in Reihe	Stapel
Speicherort		Überdacht	im Freien	im Freien
Relative Speicherkosten	[%]	340 ⁾	100 ⁾	< 100
⁾ (Hartmann, 1996)				

Für eine neu zu konzipierende Erntemaschine müssten neben neuartigen Verfahrensmerkmalen auch die leistungssteigernden Parameter der Mähwerksbreite und der Geschwindigkeit gesteigert werden; die Abbildung 5-5 zeigt die erwartete Ernteleistung für Mähwerksbreiten bis 10,5 m und Erntegeschwindigkeiten bis 6 km/h.

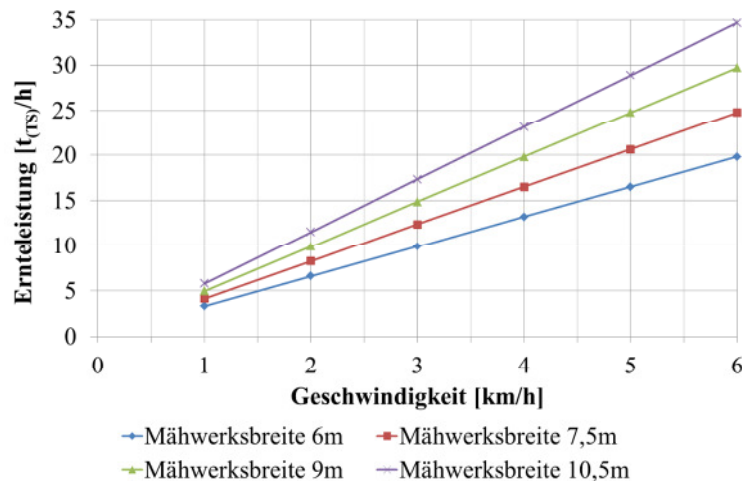


Abbildung 5-5: Zu erwartende Ernteleistungen bei einem Flächenertrag von 5,5 [t_{TM}/ha]

5.1.3 Ausblick und Empfehlungen

Das Arbeitspaket der Erntetechnik erwies sich im Laufe des Projektes als Engpass für die ökonomische Nutzung des Altschilfs im größeren Stil und diese Einschätzung wurde auch bei der Fachtagung „Reed as a Renewable Resource 2013“ (Greifswald, 2013) vermittelt.

Die derzeitige Situation stellt sich folgendermaßen dar:

- Die verfahrenstechnischen Anforderungen an eine Schilferntemaschine zur Ernte von Altschilf sind an sich bekannt.
- Eine neuartige Erntemaschine muss entwickelt werden – der aufwändige Part ist die Detailentwicklung für die Verwendung im sumpfigen Gelände.
- Die verkaufbaren Stückzahlen werden derzeit als gering angenommen, wodurch eine eigenständige Entwicklung durch Unternehmen aus dem Landmaschinenbau (z.B. Hersteller von Erntemaschinen oder Feldhäckslern) derzeit nicht angestrebt wird.
- Wie der Erfahrungsaustausch mit Akteuren in anderen Projekten im Bereich der Schilfbringung und Verwertung gezeigt hat, besteht weltweit Interesse an Projektfortschritten hinsichtlich kommerziell einsetzbarer Erntetechnologien.
- Weitere Technologieschwerpunkte wären: die Brennstoffverarbeitung zu Quaderballen, Pellets und / oder zu Briketts für die Nutzung in kommerziellen Anlagengrößen.
- Ein nächster sinnvoller Schritt wäre das Aufsetzen eines F&E-Projektes, fokussiert auf die Erntetechnik, unter Einbindung eines Produzenten von Erntemaschinen.

5.1.4 Ökologische Bewertung

Die Tabelle 5-4 zeigt die Ergebnisse für die Bewertung der Schilfernte. Es werden beide Erntemaschinen betrachtet. Die Untersuchung zeigt, dass die Ernte mit der Bündelerntemaschine „Paul 1“ mit den geringeren Umweltwirkungen verbunden ist. Die Ergebnisse sind auf 1t geerntetem Schilf bezogen. Der Grund liegt im geringen Treibstoffverbrauch, sowie in der höheren Ernte- Stundenleistung der Bündelerntemaschine „Paul 1“. Die Ballenerntemaschine „Sumo-Quaxi“ ist ein Prototyp und mit

technischen Mängeln behaftet wodurch die Belastungen höher sind als bei einer technisch einwandfreien Maschine obwohl das prinzipielle technische Konzept als sinnvoll erachtet wird.

Tabelle 5-4: Ergebnisse ökologische Bewertung Schilfernte, Erntemaschine Bündelerntemaschine und Rundballenerntemaschine, Bezug 1 [t_{FM}] Schilf

Wirkkategorie	Einheit	Bündelerntemaschine	Rundballenerntemaschine
Treibhauspotential (100 Jahre)	[kg CO ₂ -Äqv.]	1,51E+01	3,08E+01
Humantoxizitätspotential	[kg DCB-Äqv.]	3,98E+00	8,52E+00
Versauerungspotential	[kg SO ₂ -Äqv.]	1,28E-01	2,60E-01
Ozonabbaupotential (katalytisches)	[kg R11-Äqv.]	1,85E-06	3,76E-06
Feinstaubbildung	[kg PM10-Äqv.]	6,89E-02	1,40E-01

5.1.5 Ökonomische Bewertung

Die ökonomische Betrachtung der beiden Erntemaschinen ergibt folgende Ergebnisse pro Tonne geerntetes Schilf (siehe Tabelle 5-5). Die Ergebnisse wurden ohne Transportaufwendungen berechnet. Der Grund für die erhöhten Produktionskosten der Rundballenerntemaschine liegt in den Investitionskosten sowie den erhöhten Betriebskosten für die Maschine. Bei störungsfreiem Betrieb der Rundballenerntemaschine können die Erntekosten weiter gesenkt werden, wobei die Erntekosten der Bündelerntemaschine primär durch den erhöhten Personaleinsatz (5 Personen) limitiert sind. Die Hintergrund/Rohdaten für die Berechnung sind in der Tabelle 11-1 im Anhang aufgelistet. Die ökonomische Bewertung hat die jeweiligen Ernterversuchsergebnisse zum Hintergrund (Kapitel 5.1.2).

Tabelle 5-5: Ergebnisse ökonomische Bewertung Schilfernte, Erntemaschine Bündelerntemaschine und Rundballenerntemaschine, Bezug 1 [t_{FM}] Schilf

Maschine	Einheit	Kosten
Bündelerntemaschine	[€/t _{FM}]	60,81
Rundballenerntemaschine	[€/t _{FM}]	91,89

5.2 Zerkleinerung

5.2.1 Zielsetzung und Ergebnisse

Das Zerkleinern (Häckseln) der Rundballen wurde mit konventionellen Häckslern technisch demonstriert, wobei das Häckseln in mobilen Häckslern eine gangbare Lösung ist. Die technischen Leistungsdaten dieser Maschinen lagen im folgenden Bereich:

- Leistung des Dieselmotors: bis 600 kW
- Dieserverbrauch: um 65 Liter/h
- Schilfdurchsatz: bis 10 t/h

Neue Energien 2020 - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Die Abbildung 5-6 zeigt den Einsatz des mobilen Häckslers am ufernahen Lagerplatz beim Befüllen des LKW-Zuges; die Staubentwicklung deutet auf eine Überzerkleinerung des Schilfes hin. Die Abbildung 5-7 zeigt das Abkippen des 90 m³ - Containers (entsprechend einem Schilfgewicht von 11 t) beim Zementwerk.



Abbildung 5-6: Mobiler Häcksler, angetrieben über die Zapfenwelle eines Traktors, befüllt den Container

Abbildung 5-7: Abkippen der Ladung im Zementwerk

Die Vorgaben für das zerkleinerte Output- Material (Halmlänge < 10cm) konnte von beiden getesteten Maschinen gewährleistet werden. Die Zerkleinerungsleistung für Schilf weicht deutlich von den Herstellerangaben (die sich auf das Zerkleinern von Hölzern beziehen) ab. Als Engpass erweist sich dabei der Einzug des, im Vergleich zu holzartigen Inputmaterialien, Materials mit deutlich geringerer Schüttdichte. Tabelle 5-6 zeigt eine Zusammenstellung der technischen Daten sowie die Zerkleinerungsleistung der getesteten Maschinen.

Tabelle 5-6: Technische Daten und Schilfdurchsatz der verwendeten Zerkleinerungsmaschinen

Bauart	Einheit	Trommelhackmaschine	Universal- Zerkleinerer für Grünschnitt + Holz
Antrieb		Fremdantrieb Traktor	Eigenantrieb
Hackleistung lt. Herstellerangaben	[m ³ /h]	200	100
Siebkorb Maschenweite	[cm]	50 x 50	80 x 80
Schilfdurchsatz	[t _{FM} /h]	10,5	7,2

5.2.2 Ökologische Bewertung

Bei der Zerkleinerung wurden die beiden Maschinen „Trommelhackmaschine“ und „Universal-Zerkleinerer“ gegenübergestellt. Beide können sowohl für die Zerkleinerung von Bündel und auch Rundballen eingesetzt werden. Die Tabelle 5-7 zeigt die Ergebnisse für die Bewertung der Schilfzerkleinerung.

Die Untersuchung zeigt, dass die Zerkleinerung mit der Trommelhackmaschine mit den geringeren Umweltwirkungen (in allen betrachteten Kategorien) verbunden ist. Die Ergebnisse sind auf 1t geerntetem Schilf bezogen. Die höheren Ergebnisse des Universal- Zerkleinerers sind auf zwei Gegebenheiten zurückzuführen. Die Trommelhackmaschine hat eine höhere Hackleistung woraus ein größerer Schilfdurchsatz folgt und sie verbraucht weniger Diesel.

Tabelle 5-7: Ergebnisse ökologische Bewertung Schilfzerkleinerung, Trommelhackmaschine und Universal-Zerkleinerer, Bezug 1 [t_{FM}] Schilf

Wirkkategorie	Einheit	Trommelhackmaschine	Universal-Zerkleinerer
Treibhauspotential (100 Jahre)	[kg CO ₂ -Äqv.]	2,23E+01	3,11E+01
Humantoxizitätspotential	[kg DCB-Äqv.]	2,01E+00	2,65E+00
Versauerungspotential	[kg SO ₂ -Äqv.]	2,00E-01	2,79E-01
Ozonabbaupotential (katalytisches)	[kg R11-Äqv.]	2,85E-06	3,98E-06
Feinstaubbildung	[kg PM10-Äqv.]	1,06E-01	1,48E-01

5.2.3 Ökonomische Bewertung

Die ökonomische Betrachtung der beiden Zerkleinerungsmaschinen hat folgende Ergebnisse pro Tonne geerntetes Schilf ergeben. Die Ergebnisse sind ohne Transportaufwendungen berechnet.

Tabelle 5-8: Ergebnisse ökonomische Bewertung Schilfzerkleinerung, Trommelhackmaschine und Universal-Zerkleinerer, Bezug 1 [t_{FM}] Schilf

Maschine	Einheit	Kosten
Trommelhackmaschine	[€/t _{FM}]	11,57
Universal- Zerkleinerer	[€/t _{FM}]	19,01

Die Hintergrund/Rohdaten für die Berechnung sind in der Tabelle 11-1 im Anhang aufgelistet. Die Berechnungen der ökonomischen Bewertung haben die jeweiligen Versuchsergebnisse für die Zerkleinerung zum Hintergrund (Kapitel 5.2.1).

5.3 Pelletierung

5.3.1 Zielsetzung und Ergebnisse

Ziel der Versuche ist es die Einflussgrößen in der Rohstoffzusammensetzung auf den Pelletiervorgang, im speziellen die Pelletsqualität, aufzuzeigen. Die Pelletierfähigkeit von Schilf wurde in einer Labor-Pelletieranlage untersucht (siehe Abbildung 5-8). (Gold, 2012)

Die Aufbereitung beginnt mit der Zerkleinerung des Rohmaterials in einer Schneidmühle. Der Siebeinsatz der Schneidmühle hat einem Lochdurchmesser von 6mm. Die Konditionierung (Befeuchtung) und Beimengung von Additiven erfolgt händisch, mittels Bohrmaschinenrührwerk. Für die Versuche wurden definierte Mischungen mit einem Wassergehalt zwischen 12,3% und 29,1%

hergestellt. Nach der Zerkleinerung und Konditionierung wird das Inputmaterial mind. 24 Stunden gelagert um einen möglichst homogenen Wassergehalt zu gewährleisten.



Abbildung 5-8: Schema Labor- Pelletieranlage

Bei der Pelletspresse handelt es sich um einen Labor- Pelletspresse mit Flachmatrize und vollautomatischer Materialzufuhr aus der Mischmaschine. Die Drehzahl des Kollergangs kann stufenlos variiert werden und wurde bei den Versuchen in einem Bereich zwischen 50,5 Hz und 53 Hz (Frequenz des Antriebsmotors) eingestellt. Die Dosierschnecke für die Materialzufuhr kann ebenso stufenlos geregelt werden und wurde auf den maximal möglichen Durchsatz ohne Rückstau, eingestellt. Für die Versuche standen insgesamt zwei Matrizen zur Verfügung, die jeweils wechselseitig betrieben werden können. Durch die Geometrie der Presskanäle ergeben sich insgesamt drei unterschiedliche Pressverhältnisse, die je nach verwendetem Rohmaterial ausgewählt wurden. Folgende Parameter werden in den Versuchsreihen variiert:

- Wassergehalt des Inputmaterials (bezogen auf die Feuchtmasse) [%]
- Pressverhältnis Matrize: 1:5, 1:6, 1:7,5
- Additive (max. 2% der Trockenmasse): Roggenmehl, Maisstärke, Soja

Pro Versuchsdurchgang (pro Inputmaterial und Matrize) werden mindestens drei Mischungen mit unterschiedlichem Wassergehalt hergestellt. Diese Mischungen werden in Folge mittels Saugförderung in die Pelletspresse befördert. Entsprechen die Ergebnisse aus den Pressversuchen nicht den in der Norm definierten Qualitätskriterien (siehe Tabelle 5-9), werden zusätzliche Versuche unter Zudosierung von Additiven durchgeführt.

Tabelle 5-9: Qualitätskriterien – analysierte Parameter

Parameter	Einheit	Norm
Wassergehalt Pellets (Prüfnorm)	[%]	ÖNorm EN 15414-1 (2010)
Schüttdichte Pellets	[kg/m ³]	
Mechanische Festigkeit Pellets (Prüfnorm)	[%]	ÖNorm EN 15210-1 (2010)
Grenzwerte für Schüttdichte und mechanische Festigkeit		DIN EN 14961-6 (2012)

Bei den Versuchen mit Rohmaterial Schilf erwies sich ein höheres Pressverhältnis als geeignet, da bei niedrigem Pressverhältnis 1:5 der Feinanteil der Pellets zu hoch war. Die besten Ergebnisse wurden mit einem Pressverhältnis 1:7,5 erzielt. Die Pelletsqualität steigt mit steigendem Wassergehalt des Rohmaterials. Bei den Pelletiersuchen ohne Additive konnten jedoch die normativen Vorgaben gemäß DIN EN 14961-6 (2012) nicht erreicht werden. Mit der Zugabe von Additiven konnten die Qualitätskriterien erreicht werden, wobei die Additive Soja und Roggenmehl die besten Ergebnisse lieferten (siehe Abbildung 5-9 und Abbildung 5-10). (Krail, 2013)

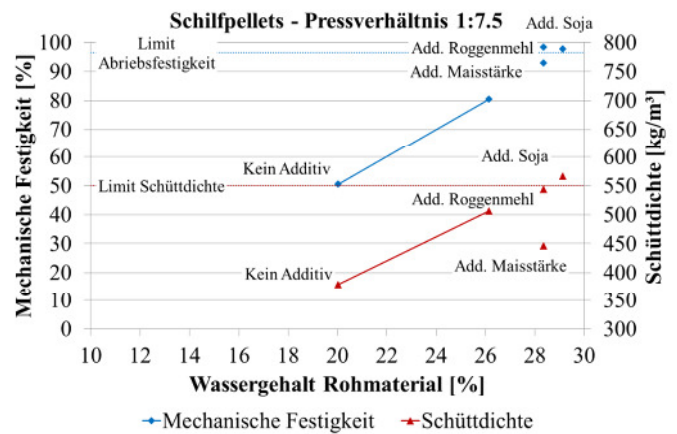
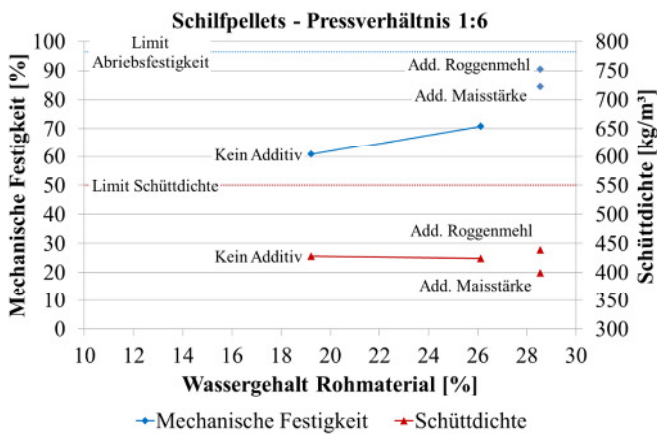


Abbildung 5-9: Pelletiersuche Pressverhältnis 1:6

Abbildung 5-10: Pelletiersuche Pressverhältnis 1:7,5

Im Gegensatz zu Literaturangaben für die industrielle Pelletierung, ist bei der Labor- Versuchsanlage ein höherer Wassergehalt des Inputmaterials erforderlich. Der Grund liegt im erhöhten spezifischen Energieeintrag der Labor- Pelletieranlage im Vergleich zu industriellen Anlagen. Bei den Schilf-Versuchen liegt der spezifische Energieinput der Labor- Pelletieranlage bei 120 – 255 kWh/t produzierter Pellets, hingegen liegt dieser Wert bei der industriellen Pelletierung in einem Bereich von 63 – 170 kWh/t produzierter Pellets für die komplette Produktionsanlage (Moser, 2009). Durch den erhöhten Energieinput findet vor dem eigentlichen Pressvorgang im Bereich der Matrize bereits eine Vortrocknung des Materials statt. Der Wassergehalt der produzierten Pellets liegt in einem Bereich von 9,1 – 14,9%, was diese Vermutung bestätigt.

5.3.2 Ökologische Bewertung

Als Grundlage dienen die Angaben für die Herstellung von Holzpellets. Die Infrastruktur wird für die Schilfpellets- Produktion beibehalten, ebenso wie die nötigen Energieaufwendungen pro Tonne Inputmaterial. Die Ergebnisse sind ohne Transportaufwendungen berechnet.

Tabelle 5-10: Ergebnisse ökologische Bewertung pelletieren Schilf, Bezug 1 [t_{FM}] Schilf

Wirkkategorie	Einheit	Pelletieren
Treibhauspotential (100 Jahre)	[kg CO ₂ -Äqv.]	9,82E+01
Humantoxizitätspotential	[kg DCB-Äqv.]	2,89E+01
Versauerungspotential	[kg SO ₂ -Äqv.]	1,79E-01
Ozonabbaupotential (katalytisches)	[kg R11-Äqv.]	9,59E-06
Feinstaubbildung	[kg PM10-Äqv.]	6,32E-02

5.3.3 Ökonomische Bewertung

Für das Pelletieren wird mit einem Preis von 38,3 €/t_{FM} Inputmaterial, nach Obernberger und Thek (2009), kalkuliert. Diese Preisangabe wurde durch Nachfrage bei Pelletsproduzenten überprüft und als derzeit marktüblich festgestellt (Firmen wollen nicht genannt werden).

5.4 Lagerung

Für die Lagerung werden drei Möglichkeiten in den Bereitstellungsketten angewendet und untersucht. Ganz zu Anfang nach der Ernte steht meist die Lagerung am freien Gelände (Bündel oder Rundballen). Im weiteren Verlauf wird das Schilf in landwirtschaftlichen Hallen (Dach und an drei Seiten geschlossen) oder in Speziallager für Häckselgut bzw. Pellets eingelagert. Die Wahl der Art des Lagers ist vor allem von der Brennstoffbeschaffenheit abhängig.

5.4.1 Ökologische Bewertung

Die Tabelle 5-11 zeigt die Ergebnisse der ökologischen Bewertung der verschiedenen Lagermöglichkeiten pro Tonne Inputmaterial. Die Ergebnisse sind ohne Transportaufwendungen berechnet, jedoch inkl. der Aufwendungen für das Ein- und Auslagern. Da die Ergebnisse für unterschiedliche Lagergüter (Bündel beim freien Gelände, Rundballen bei der landwirtschaftlichen Halle und Pellets beim Speziallager) berechnet wurden sind diese nur bedingt vergleichbar. Das Ein- und Auslagern erfolgt beim freien Gelände und der landwirtschaftlichen Halle durch einen Traktor. Die einfachste Lagerform, das freie Gelände, weist die geringsten Umweltauswirkungen auf, das ist darauf zurückzuführen, dass hier keine Infrastruktur (Gebäude) benötigt wird. Danach liegen die Halle und das Speziallager. Der Unterschied zwischen diesen beiden Lagerarten entsteht durch die unterschiedliche Schüttdichte des eingelagerten Brennstoffs – auf gleicher Lagerfläche können wesentlich mehr Tonnen Pellets als Ballen gelagert werden.

Tabelle 5-11: Ergebnisse ökologische Bewertung Schilflagerung, verschiedene Lagermöglichkeiten und -güter (Bündel, Ballen, Pellets), Bezug 1 [t_{FM}] Schilf

Wirkkategorie	Einheit	Freies Gelände (Bündel)	Landw. Halle (Ballen)	Speziallager (Pellets)
Treibhauspotential (100 Jahre)	[kg CO ₂ -Äqv.]	6,59E-01	1,75E+01	1,82E+00
Humantoxizitätspotential	[kg DCB-Äqv.]	5,10E-01	1,03E+01	8,10E-01
Versauerungspotential	[kg SO ₂ -Äqv.]	5,84E-03	7,53E-02	1,51E-02
Ozonabbaupotential (katalytisches)	[kg R11-Äqv.]	3,99E-07	1,30E-06	1,34E-07
Feinstaubbildung	[kg PM10-Äqv.]	1,66E-03	4,02E-02	6,14E-03

5.4.2 Ökonomische Bewertung

Für die ökonomische Betrachtung sind die Lagerung am freien Gelände (am Rand des Schilfgürtels) und eine Lagerung in einer landwirtschaftlichen Halle zu bewerten. Die Lagerkosten für die Halle variieren ob Bündel oder Rundballen eingelagert werden. Die Ergebnisse (Tabelle 5-12) sind ohne Transportaufwendungen berechnet.

Tabelle 5-12: Ergebnisse ökonomische Bewertung Schilflagerung, landwirtschaftliche Halle und freies Gelände, Bezug 1 [t_{FM}] Schilf

Lagerart	Lagergut	Einheit	Kosten
Landwirtschaftliche Halle	Bündel	[€/t _{FM}]	6,83
	Rundballen	[€/t _{FM}]	9,18
Freies Gelände	Bündel oder Rundballen	[€/t _{FM}]	0,35

Die angeführten Lagerkosten beinhalten die Aufwendungen für das Ein- und Auslagern, wobei hierfür ein Traktor mit Frontlader zum Einsatz kommt. Für das freie Gelände wird lediglich das Stapeln mittels Traktor und Frontlader als Kostenpunkt angesetzt.

Die Hintergrund/Rohdaten für die Berechnung sind in der Tabelle 11-1 im Anhang aufgelistet.

5.5 Logistik

Bei der Schilflogistik wird zwischen der Schilflogistik innerhalb bzw. Schilflogistik außerhalb des Schilfgürtels unterschieden.

Die Schilflogistik innerhalb des Schilfgürtels ist durch die maximale Eindringtiefe der Erntemaschinen bestimmt. Ausgehend von den derzeit vorhandenen Erntemaschinen wird von einer Eindringtiefe von einem Kilometer ausgegangen. Für Flächen, deren Abstand zum Ufer bzw. zu Dämmen größer dieser maximalen Eindringtiefe ist, entsteht ein zusätzlicher Transportaufwand für den Transport zum Lagerplatz vor Ort (siehe Abbildung 5-11). Beim Transport mit einem Transportshuttle entsteht ein zusätzlicher Aufwand durch das Umladen, welcher in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt wurde. Für den Transport außerhalb des Schilfgürtels zum vor-Ort Lager bzw. das Be- und Entladen wurde der Einsatz eines Traktors kalkuliert.

Für den Transport außerhalb des Schilfgürtels zum jeweiligen Abnehmer bzw. zur Weiterverarbeitung im Pelletierwerk, wurde der Transport in LKW's mit 90m³ Anhänger und Schubbodenaustragung kalkuliert. Der Transport von Pellets erfolgt mit dafür konzipierten Pellets-Pumpwägen mit einem Fassungsvermögen von 25 t.

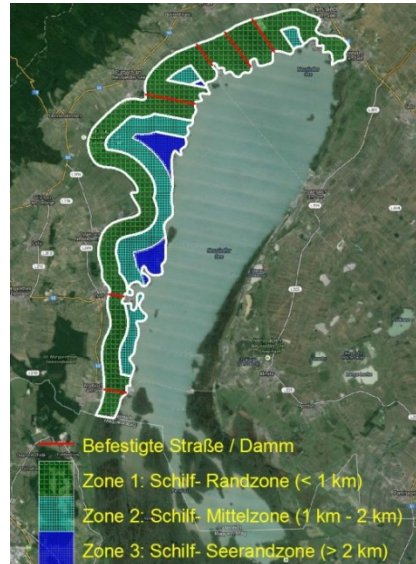


Abbildung 5-11: Schilfgürtel – Einteilung in Zonen

5.5.1 Ökologische Bewertung

Für den Transport werden zwei mögliche Transportmittel in der Bereitstellungskette untersucht, der Traktor und der LKW. Die Wahl des Transportmittels hängt zumeist von der zurückzulegenden Distanz ab. Ausschlaggebend für die Effizienz des Transportes ist, in welcher Form, als Bündel, Ballen, Häckselgut oder Pellets, das Schilf transportiert wird. Die Berechnung erfolgt für eine Tonne Transportgut über einen km Transportdistanz (Angabe in Schadstoffmenge pro [tkm]).

Der Transport von Pellets hat die geringsten ökologischen Auswirkungen (Tabelle 5-13), beim Vergleich Bündel zu Ballen weist der Transport von Bündel die geringeren Umweltwirkungen auf (Tabelle 5-13 und Tabelle 5-14). Der Grund dafür liegt wieder in der Schüttdichte, es ist möglich mehr Material zu transportieren, wenn das Schilf in Form von Pellets vorliegt.

Tabelle 5-13: Ergebnisse ökologische Bewertung Schilftransport mit LKW; Bündel, Ballen, Häckselgut, Pellets; Bezug 1 [t_{FM}] Schilf; Ergebnisse bezogen auf [tkm]

Wirkkategorie	Einheit	Bündel	Ballen	Häckselgut	Pellets
Treibhauspotential (100 Jahre)	[kg CO ₂ -Äqv.]	2,67E-01	3,05E-01	1,28E-01	5,12E-02
Humantoxizitätspotential	[kg DCB-Äqv.]	4,38E-02	5,01E-02	2,10E-02	8,41E-03
Versauerungspotential	[kg SO ₂ -Äqv.]	1,45E-03	1,66E-03	6,95E-04	2,78E-04
Ozonabbaupotential (katalytisches)	[kg R11-Äqv.]	4,30E-08	4,91E-08	2,06E-08	8,25E-09
Feinstaubbildung	[kg PM10-Äqv.]	6,76E-04	7,72E-04	3,24E-04	1,30E-04

Tabelle 5-14: Ergebnisse ökologische Bewertung Schilftransport mit Traktor; Bündel und Ballen; Bezug 1 [t_{FM}] Schilf; Ergebnisse bezogen auf [tkm]

Wirkkategorie	Einheit	Bündel	Ballen
Treibhauspotential (100 Jahre)	[kg CO ₂ -Äqv.]	7,09E-01	8,93E-01
Humantoxizitätspotential	[kg DCB-Äqv.]	4,73E-01	3,76E-01
Versauerungspotential	[kg SO ₂ -Äqv.]	4,91E-03	3,90E-03
Ozonabbaupotential (katalytisches)	[kg R11-Äqv.]	1,05E-07	8,36E-08
Feinstaubbildung	[kg PM10-Äqv.]	2,82E-03	2,24E-03

5.5.2 Ökonomische Bewertung

Als Transportmittel werden ein Traktor und ein LKW mit entsprechendem Hänger bewertet. Es besteht ein Unterschied in welcher Form das Schilf transportiert wird, Bündel, Rundballen, Häckselgut oder Pellets. Die jeweiligen Kosten werden in Tabelle 5-15 dargestellt. Es zeigt sich, dass der Transport als Häckselgut und Pellets mit den geringsten Kosten verbunden ist.

Tabelle 5-15: Ergebnisse ökonomische Bewertung Transport, Traktor und LKW, Ergebnisse bezogen auf [tkm]

Transportmittel	Transportgut	Einheit	Kosten
Traktor ¹⁾	Bündel	[€/tkm]	2,34
	Rundballen	[€/tkm]	2,37
LKW ²⁾	Bündel	[€/tkm]	0,242
	Rundballen	[€/tkm]	0,276
	Häckselgut	[€/tkm]	0,116
	Pellets	[€/tkm]	0,046

Die Hintergrund/Rohdaten für die Berechnung sind in der Tabelle 2-1 im Anhang aufgelistet.

6 THERMISCHE VERWERTUNG

6.1 Stoffliche und thermische Verwertung Zementindustrie

Aufgrund des hohen Anteils der Energieträgerkosten sowie der unmittelbaren Auswirkungen der verwendeten Energieträger auf die Emissionen (u.a. CO_{2,fossil}-Emissionen) steht unter dem Blickwinkel energie- und umweltpolitischer Zielsetzungen die Optimierung der Energieversorgung des Klinkerbrennprozesses im Fokus der Zementwerksbetreiber in Österreich bzw. Europa insgesamt. In diesem Zusammenhang ist insbesondere der europaweite Emissionshandel (Emissionshandelsrichtlinie, 2009) für CO_{2,fossil} und die aufgrund eines sinkenden Volumens an verfügbaren Emissionsrechten zu erwartende Verschärfung der Situation für verpflichtete Handelsteilnehmer im Kontext der EU 20-20-20 Ziele (E-Control (Hrsg.), 2012) (BCG (Hrsg.), 2008) von Bedeutung. Aktuell ist das Angebot an Emissionsrechten zwar insbesondere infolge der Auswirkungen der Wirtschaftskrise ausreichend, seitens der Europäischen Union wird jedoch an Korrekturen des Europäischen Emissionshandels – Stichwort Backloading – gearbeitet, die eine entsprechende Verknappung der Emissionsrechte und damit steigende Kosten für Emissionsrechte zum Ziel haben (VDI (Hrsg.), 2013).

Die Entwicklungen und Untersuchungen der letzten Jahre in der Zementindustrie fokussieren hier – neben verfahrenstechnischen Optimierungen im Bereich Energieeffizienz und einer Steigerung des Einsatzes von Zuschlagstoffen – auf eine Erhöhung der Substitutionsrate konventioneller, fossiler Energieträger durch – teils biogene – Brennstoffe wie z. B. Schilf, Klärschlamm und Ersatzbrennstoff mit erhöhtem biogenem Anteil unter Berücksichtigung der verfahrenstechnischen Möglichkeiten (Brennstofflogistik, Vorbrennkammer, CI-ByPass, ...) (Mauschitz, 2011a) (Spaun, 2011).

Der Einsatz eines neuen Brennstoffes erfordert vor der großtechnischen Umsetzung eine umfassende Prüfung hinsichtlich der technischen Machbarkeit. Neben Aspekten der Brennstofflogistik sind hier jedenfalls die Auswirkungen auf die stabile Prozessführung sowie die Produktqualität und die gasförmigen Emissionen zu evaluieren. Die Brennstoffeigenschaften alternativer Brennstoffe haben hier einen entscheidenden Einfluss und können aufgrund ihrer Auswirkungen auf den Prozess / das Produkt bzw. etwaig dadurch erforderlicher Anlageninvestitionen die reale Umsetzung des Einsatzes von Alternativbrennstoffen sehr rasch in Frage stellen. Darüber hinaus sind auch die ganzheitlichen Auswirkungen des Einsatzes eines bestimmten alternativen Brennstoffs auf die wirtschaftlichen Implikationen für den Klinkerbrennprozess zu beurteilen. Aufgrund der Dynamik des Marktumfelds und eines sich verschärfenden rechtlichen Rahmens ist neben der statischen Betrachtung unter getroffenen Annahmen auch die Betrachtung der Abhängigkeit der wirtschaftlichen Auswirkungen von sich ändernden Rahmenbedingungen hinsichtlich der Brennstoffpreise sowie der Kosten für CO₂-Emissionsrechte wesentlich um die richtigen Entscheidungen für ein betriebswirtschaftliches Optimum zu treffen.

6.1.1 Zielsetzung, Materialien und Methodik

Ein Ziel des vorliegenden Forschungsprojekt ENEREED lag in der Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von Schilf als alternativer Brennstoff sowie des Einsatzes von Schilfasche als Ersatzrohstoff in der Zementindustrie.

Der Einsatz von Schilf in der Zementindustrie wurde anhand einer Literatur- und Marktrecherche sowie im Rahmen von zwei großtechnischen Versuchen (ein Kurzzeitversuch und ein Langzeitversuch) im Zementwerk Mannersdorf evaluiert. Die Möglichkeiten des Einsatzes von Schilfasche als Ersatzrohstoff wurden auf Basis einer Literatur- und Marktrecherche analysiert.

Neben den technischen Aspekten des Schilf- und Schilfascheneinsatzes wurden auch die sich auf Basis der im Rahmen der großtechnischen Versuche ermittelten Einsatzmöglichkeiten von Schilf sowie des verfügbaren Potentials an Schilfasche ergebenden Grenzvermeidungskosten für CO_{2,fossil} analysiert.

6.1.1.1 Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe in der Zementindustrie

Im Jahr 2009 wurden branchenweit in pyrogenen Anlagen der österreichischen Zementindustrie ca. 4.600 t Ölsaatenrückstände, z.B. Sonnenblumenschalen, mit einem Heizwert von ca. 17 GJ/t verfeuert. 2004 kamen ca. 1.000 t mit Getreidepilz kontaminiertem Mais mit einem Heizwert von ca. 16 GJ/t der energetischen Nutzung in der Zementindustrie zugute (Mauschitz, 2011b).

Nachwachsende Rohstoffe wie Schilf, Heu und Hackschnitzel wurden großtechnisch in der österreichischen Zementindustrie bis dato nicht eingesetzt. Der Grund dafür liegt unter anderem darin, dass biogene Brennstoffe im Vergleich zu konventionellen fossilen Regelbrennstoffen wie Kohlen, Erdölprodukte oder Erdgas über einen relativ niedrigen Heizwert verfügen. Ein weiterer Grund des bisher noch geringen Einsatzes an biogenen Brennstoffen liegt auch an ihrer erschwerten Förderung im Rahmen der Brennstoffeinbringung im Zementwerk selbst. Ein vermehrter Einsatz biogener Brennstoffe pflanzlicher Herkunft in Hochtemperaturprozessen, wie in der Zementindustrie üblich, kann unter anderem durch erschwerte Förderung des biogenen Brennstoffs zu den Brennern (Stopfer) und durch Dosierprobleme zu höheren Abgasströmen (Falschluff) und infolge dessen zu höheren Abgasverlusten führen. Dies kann eine Abnahme des thermischen Anlagenwirkungsgrades mit verursachen. Darüber hinaus können sich im Störfall durch Rückschaltprozesse auf Regelbrennstoffe CO-Spitzen bilden, die zu einer zeitweisen Abschaltung der Elektroentstaubung und dahingehende Explosionsgefahr führen können (Mauschitz, 2011b). Der Einsatz von biogenen Einsatzstoffen/Nawaros in der Zementindustrie hat auch wegen der hohen für den Klinkerbrennprozess notwendigen Flammentemperaturen von 2.000°C (notwendige Brenntemperatur des Rohmehls von 1.470°C) in Verbindung mit der vergleichsweise geringen Energiedichte der biogenen Brennstoffe bisher eine geringe Bedeutung. Trotzdem werden z. B. im Zementwerk Wietersdorf ca. 20% der eingesetzten Brennstoffe aus biogenem Ursprung (biogener Anteil der aufbereiteten Gewerbe- und Industrieabfälle, Klärschlämme, Papier Reject, etc.) verwendet (Diexer, 2011).

Neben den bereits genannten Einschränkungen sind vor allem die Verfügbarkeit und der Preis Hauptgründe für die geringen Einsatzmengen an biogenen Einsatzstoffen in der Zementindustrie (Mauschitz, 2011b). Zudem verfügen die Zementwerke im mitteleuropäischen Raum über

abfallrechtliche Genehmigungen für den Einsatz großer Mengen an abfallbürtigen Ersatzbrennstoffen. Dies steht in Verbindung mit der Tatsache, dass der Einsatz dieser Abfälle als Alternativbrennstoff preislich interessanter ist als jener von Biomasse, bei welcher die Nachfrage und damit der Preis insbesondere aufgrund der hohen Wachstumsraten beim Einsatz von Biomasse als erneuerbare Energie zurzeit viel größer ist, einer Steigerung des Anteil biomasse-basierter Brennstoffe in der Zementindustrie entgegen.

In Bezug auf die Einsetzbarkeit von Nawaros in der Zementindustrie besteht zwar noch großes Potenzial, jedoch ist die Verfügbarkeit zurzeit in den gewünschten Mengen nicht gegeben (Röck, 2011). Dazu sind die Mengen, die von einzelnen Biomasseproduzenten bezogen werden, viel geringer als die Abfallmenge von großen Abfallsammlern und somit ist die Akquirierung ausreichender Mengen zeit- und damit auch kostenintensiver (Philipp, 2011). Der Einsatz von biogenen Brennstoffen sollte zwar ökologisch betrachtet werden, jedoch sollte dessen Einsatz parallel, z. B. aufgrund zukünftig prognostizierter Versorgungssicherheit von z.B. holzartiger Biomasse, auch kritisch hinterfragt werden (Mauschitz, 2011b).

Neben den gegenständlichen Untersuchungen des Einsatzes von Schilf als Alternativbrennstoff im Zementwerk Mannersdorf erfolgte im Jahr 2008 in einem weiteren österreichischen Zementwerk ein Versuch ca. 20 t an Schilf als möglicher Alternativbrennstoff zu testen. Ziel dieses Versuches war es, die Verbrennung von auf <5 mm zerkleinerten Schilfes an der Primärfeuerung, an welcher in jenem Zementwerk ca. 50% der gesamten Energie benötigt wird, zu testen. Aus diesem Kurzzeitversuch, konnten speziell für dieses Zementwerk und den Einsatzzweck nachfolgend dargestellte Erkenntnisse gewonnen werden.

Die Zufeuerung von Schilf in der Primärfeuerung mittels Stützflamme erschwerte die Einhaltung der benötigten Prozesstemperaturen, womit eine zusätzliche Zufeuerung von hochkalorischen alternativen Brennstoffen von Nöten war (Philipp et al., 2011). Aufgrund der niedrigen Temperaturen (800 bis 900°C) am Calcinator (gegenüber jenen an der Primärfeuerung mit einer Flammentemperatur von 2.000°C) wäre die Auswirkung des Schilfeinsatzes am Calcinator viel geringer als dies an der Primärfeuerung der Fall wäre (Lampl, 2011).

Der Eintrag von Chlor in den Zementwerksprozess ist als kritisch zu betrachten, da ein erhöhter Chloreintrag zu Ansatzbildungen in den Anlagen, z.B. im Wärmetauscher, führt. In der Praxis hängt der maximal zulässige Chlorgehalt auch sehr stark von der am Zementwerk eingesetzten Technologie, wie z. B. dem Vorhandensein eines Cl-Bypasses, oder dem Chlorgehalt der sonstigen Roh- und Brennstoffe ab (Spaun, 2010). Da hinsichtlich alternativer Brennstoffe in jenem Zementwerk, bereits Ersatzstoffe mit einem erhöhten Anteil an Chloriden eingesetzt werden, wie zum Beispiel Papierfaserreststoffe, war der zusätzliche Chlorideintrag durch den Einsatz von Schilf problematisch. Ein zu hoher Chloreintrag könnte dazu führen, dass der Grenzwert im Zement von 0,1% nicht mehr eingehalten werden kann. Darüber hinaus würde es bei einem kontinuierlichen Einsatz von Schilf zu Prozesseinschränkungen kommen. Um einen vermehrten Eintrag von Chlorid bei der Verwertung von Schilf zu unterbinden, müsste man in einem solchen Falle, einen der sonstigen - schon fixen und wirtschaftlich vorteilhafteren - alternativen Ersatzstoffe weglassen (Philipp et al., 2011).

Der Anfall an vermehrter Asche durch die Schilfverbrennung stellte keinerlei Probleme, weder für die Prozessstabilität noch für die Klinkerqualität, dar. Dies basiert darauf, dass ein Mehranfall an Asche durch die Mitverbrennung von Schilf im Klinkerbrennprozess mittels reduzierter Zufuhr der sonstigen Roh- und Brennstoffe ausgeglichen werden kann. Zudem passt die anfallende Asche sehr gut in das benötigte Stoffgemisch der Klinkerzusammensetzung (Wurst, 2011). Der Versuch zeigte, dass man in jenem Zementwerk max. 10 bis 20% der Energie an der Primärfeuerung mittels Schilf decken konnte (Philipp et al., 2011). Im Gegensatz zur Primärfeuerung, welche eine Flammentemperatur an die 2.000°C aufweist, benötigt man im Calcinator geringere Temperaturen (800 bis 900°C). Dies bedeutet, dass in der Calcinator-Feuerung, abgesehen von den hier einzuhaltenden Qualitätskriterien in punkto Stückigkeit und Störstoffgehalt, Brennstoffe mit niedrigen Heizwerten (Richtwert: >10 MJ/kg) eingesetzt werden können (Koglbauer, 2011) (Philipp et al., 2011). Daraus lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass es an der Calcinator-Feuerung, an welcher in diesem Zementwerk ebenfalls ca. 50% der Energie benötigt wird, denkbar sei, den größten Teil der benötigten Energie mittels nachwachsender Rohstoffe, welche die benötigte Qualität aufweisen, einzubringen (Philipp et al., 2011). Mit dem Anstieg der Bedeutung der Calcinator-Feuerung in der Zementindustrie steigen auch die Möglichkeiten des Einsatzes von Brennstoffen geringerer Energiedichte und niedrigeren Heizwerts.

6.1.1.2 Nutzung der Schilfasche als Zumahlstoff

Zumahlstoffe verringern den Klinkerfaktor, also den Anteil des Klinkers, der im Mahlprozess für die Zementherstellung benötigt wird. Der Einsatz an Zumahlstoffen bewirkt neben der Schonung von Rohstofflagerstätten und - im Falle der Verwendung sekundärer Zumahlstoffe (SZS) - der sinnvollen Verwertung von abfallbürtigen Materialien (Mauschitz & Hackl, 2007) einen geringeren spezifischen Wärmebedarf pro Tonne Zement, da eine geringere Menge Klinker aus dem Klinkerbrennprozess, welcher den energieintensivsten Teil der Zementherstellung ausmacht, benötigt wird. Der Einsatz von Zumahlstoffen bewirkt darüber hinaus auch geringere geogen bedingte - aus der Decarbonatisierung stammende – Kohlenstoffdioxidemissionen der Zementproduktion.

Zumahlstoffe beeinflussen auch die chemischen und mechanischen Eigenschaften sowie das Abbindeverhalten von hydraulischen Bindemitteln, wie Zement. Weiters können Verunreinigungen von Zumahlstoffen negative Auswirkungen auf das optische Erscheinungsbild haben (Lampl, 2010). Diese Aspekte haben zur Folge, dass nur sehr restriktiv ausgewählte Sekundärstoffe als Zumahlstoffe verwendet werden können (Mauschitz & Hackl, 2006).

Biomasseasche kann nicht als Zumahlstoff zum Klinker verwendet werden, da mit der Zugabe nach dem Klinkerbrennprozess die Qualitätskriterien für Zement nicht erreicht werden können. Abgesehen vom Risiko, dass einige Biomasseaschen höhere Schwermetallgehalte aufweisen, führen unverbrannte organische Anteile zu Qualitätsproblemen im Zement und später im Beton. Da die Rostaschen aus Biomassefeuerungen meist aus kleineren Anlagen stammen, ist von unverbrannten Bestandteilen auszugehen. Diese unverbrannten organischen Anteile schwimmen im Beton auf und führen zu farblich unerwünschten schwarzen Flecken, welche zu vermeiden sind (Lampl, 2010). Zudem hat für die Verwendung von Aschen als Zumahlstoff im Zement die „ÖNORM B3309 für AHWZ“ (Aufbereitete hydraulisch wirksame Zusatzstoffe für die Betonherstellung) Gültigkeit, aufgrund welcher der größte Teil an Biomasseflugaschen als nicht geeignet eingestuft werden muss (Wilflingseder, 2010). Es dürfen

zurzeit nur Flugaschen eingesetzt werden, die dieser Norm - der nationalen Umsetzung der europäischen Norm EN 450-1 entsprechen (Philipp et al., 2011).

Bei der Zugabe der Biomasseasche in das Rohmehl vor dem Klinkerbrennprozess besteht die Gefahr der negativen Beeinflussung der Zementqualität nicht, da die Asche mitsamt dem Rohmehl den Drehrohrofen passieren muss und somit mögliche unverbrannte Bestandteile aufgrund der dort vorherrschenden hohen Temperaturen, bei einer max. Flammentemperatur von 2.000°C, vollständig thermisch zersetzt sowie die Asche in die Klinkermatrix eingebunden wird. Bei der Zugabe zum gemahlene Klinker bzw. zum Klinker vor der Klinkermühle erfolgt lediglich eine Vermischung und keine Einbindung in den Klinker (Philipp et al., 2011).

Zusammenfassend kann für den Einsatz von Biomasseasche als Zuschlagstoff im Zementwerk die Aussage getroffen werden, dass diese Aschen die benötigte Qualität für diese Verwertung nicht vorweisen. Aus diesem Grunde wird Biomasseasche zurzeit nur als Ersatzrohstoff in Zementwerken eingesetzt.

6.1.1.3 Großtechnische Versuche des Einsatzes von Schilf als alternativer Brennstoff

6.1.1.3.1 Kurzzeitversuch

Der erste großtechnische Verbrennungsversuch im Rahmen des Forschungsprojekts ENEREED fand im Juni 2011 im Zementwerk Mannersdorf der Lafarge Zementwerke GmbH statt. Hierbei wurden 18,6 Tonnen gehäckseltes Schilf innerhalb von ca. zwei Stunden als alternativer Brennstoff in der Calcinator-Feuerung eingesetzt (Markowitsch, 2011).

Das in vier LKW-Transporten in Bündel angelieferte Schilf wurde auf eine Halmlänge von <10 cm gehäckselte und in Form eines Schüttkegels auf dem Boden aufgeschüttet. Im Zementwerk wurde das Schilf im ASB-Bunker (ASB steht für Aufbereiteter Substitut-Brennstoff) zwischengelagert, bis es durch eine Schnecke auf eine Dosierwaage und schließlich auf das Förderband des Rohrgutförderers (Pipe Conveyor) aufgebracht wurde. Der Pipe Conveyor beförderte das Schilf auf die dritte Ebene des Wärmetauscherturms, wo es pneumatisch in den Calcinator eingebracht wurde.

Die Zielsetzung dieses Versuches lag ausschließlich in der Prüfung der anlagentechnischen Möglichkeiten im Bereich der Brennstoffförderung und –einbringung als Vorbereitung für den ebenfalls geplanten Langzeitversuch. Während dieses Versuchs sollten mit dem Schilf 27% der Brennstoffwärmeleistung, bei einer einzubringenden Gesamtenergie von ca. 3.450 kJ/kg Klinker, gedeckt werden, wobei das energetisch genutzte Schilf einen Heizwert von rund 16 MJ/kg aufweisen sollte (Ehrenberg, 2011). Tabelle 6-1 zeigt die während des Versuches in der stationären Phase eingesetzten Brennstoffe sowie deren Anteil an der Brennstoffwärmeleistung.

Tabelle 6-1: Zur Zeit des Versuches eingesetzte Brennstoffe (Markowitsch, 2011)

Einsatzort	Brennstoff	Heizwert	Menge	Brennstoffwärmeleistung	
		[MJ/kg]	[kg/h]	[MJ/h]	[%]
Calcinator	PetCoke	32,7	3.640	119.028	33,6
	Schilf	16,5	8.000	131.753	37,2
Primärfeuerung (Drehrohrofen)	PetCoke	32,7	2.290	74.890	21,1
	Tiermehl	17,8	570	10.146	2,9
	Sonnenblumenschalen	16,9	1.100	18.590	5,2
SUMME	-	-	-	354.407	100,0

6.1.1.3.2 Langzeitversuch

Der Langzeitversuch fand im Mai 2012 ebenfalls im Zementwerk Mannersdorf statt. Das Ziel bestand darin über einen längeren Zeitraum die Menge von ca. 8 t Schilf pro Stunde als Brennstoff am Calcinator einzusetzen um auf dieser Basis Hinweise über mögliche Auswirkungen des Schilfeinsatzes auf die Prozessführung, die Produktqualität sowie die Situation in Hinblick auf gasförmige Emissionen zu erhalten.

Im Unterschied zum ersten Versuch wurde das Schilf hier nicht auf eine Halmlänge von <10 cm, sondern auf <5 cm zerkleinert. Ein weiterer Unterschied zum Kurzzeitversuch bestand darin, dass beim Langzeitversuch das Schilf direkt in einen Liefercontainer gehäckselt wurde anstatt es nach dem Häckseln mittels Schaufelbagger vom Boden in den LKW zu schaufeln. Dadurch konnte die Einbringung von Fremdkörpern (wie beispielsweise Steine) in das Brennmaterial reduziert werden.

Beim Start des Versuchs traten zunächst Probleme mit der Förderung des Schilfs auf. Das Schilf verstopfte die Anlage, blieb an einigen Stellen hängen und es kam zu sehr starken Schwingungen an der Messwaage. Dieses Problem konnte durch die Abstimmung der verschiedenen Antriebsmotore des Pipe Conveyors behoben werden, wodurch – wie geplant - die kontinuierliche Zufuhr von rund 8 t/h Schilf in den Calcinator möglich war. Im Verlauf des zweiten Versuchstages konnten dem Calcinator bis zu 8,5 t/h Schilf zugeführt werden.

Abbildung 6-1 zeigt den während des Langzeitversuchs eingesetzten und für die weiteren Auswertungen herangezogenen Brennstoffmix.

In Hinblick auf die Beurteilung gasförmiger Emissionen waren die Möglichkeiten aufgrund kurz vor und während des Langzeitversuchs aufgetretener – aber nicht auf den Einsatz von Schilf als Alternativbrennstoff zurückzuführender - Prozessinstabilitäten sowie eines Ausfalls der SNCR-Anlage beschränkt.

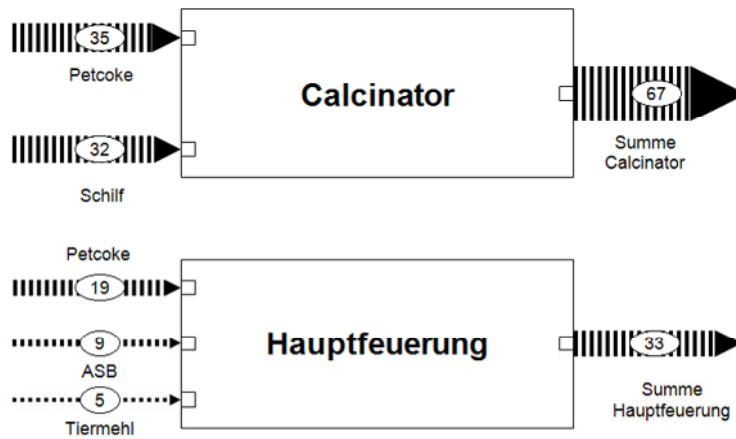


Abbildung 6-1: Brennstoffmix Schilfversuch (Angaben als Anteil an der zugeführten Gesamtenergie)

6.1.2 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

6.1.2.1 Kurzzeitversuch

Prozesstechnisch gesehen, sollten zunächst ca. 10 Tonnen Schilf pro Stunde in den Calcinator eingebracht werden. Dies konnte der Pipe Conveyor in Richtung Calcinator jedoch nicht verarbeiten. Aufgrund dessen wurde der Wert auf 8 Tonnen Schilf pro Stunde herabgesetzt. Mit 8 t/h lief der Versuch nach ca. 50 Minuten sehr stabil und somit konnte der Versuch, bis auf die genannten Anfangsschwierigkeiten, insgesamt ohne weitere Probleme durchgeführt werden. Die Abweichung vom Ist-Wert zum Soll-Wert von 8 t/h des eingesetzten Schilfes liegt im normalen Toleranzbereich und betrug +/- 500 kg/h (Markowitsch, 2011).

6.1.2.2 Langzeitversuch

Im Rahmen des Langzeitversuchs wurde der in Abbildung 6-1 dargestellte Brennstoffmix eingesetzt. Nachfolgend werden die auf Basis der laufenden Prozessüberwachung am Zementwerk Mannersdorf im Rahmen des Langzeitversuchs gemachten Beobachtungen erläutert und mit den jeweils im Rahmen des Einsatzes des Standardbrennstoffmixes (vgl. Abbildung 7-4) ermittelten Referenzwerten verglichen.

6.1.2.2.1 Auswirkungen auf die Produktqualität

Während des Herstellungsprozesses werden kontinuierlich Klinkerproben genommen und ihre Zusammensetzung untersucht. Mit Hilfe der Untersuchungsergebnisse konnten im Anschluss verschiedene Qualitätskriterien für den Klinker berechnet werden.

Für den Vergleich der Klinkerqualität wurden dabei folgende Qualitätsmerkmale herangezogen:

- Silikatmodul
- Tonerdemodul
- Kalkstandard II

Die hier genannten Qualitätsmerkmale für die Klinkerherstellung wurden beim Einsatz von Schilf als Alternativbrennstoff erfüllt und die Rechenwerte lagen im Toleranzbereich, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass es zu keiner Beeinträchtigung der Klinkerqualität durch die Verwendung von Schilf als Alternativbrennstoff gekommen ist. In Abbildung 6-2 bis Abbildung 6-4 wird der Vergleich der berechneten Werte für den Fall des Einsatzes von Schilf als alternativem Brennstoff mit den im Rahmen der Verwendung des standardmäßig eingesetzten Brennstoffmix ermittelten Werten sowie den Prozesssteuerungsgrößen (Minimal- und Maximalwerte) dargestellt.

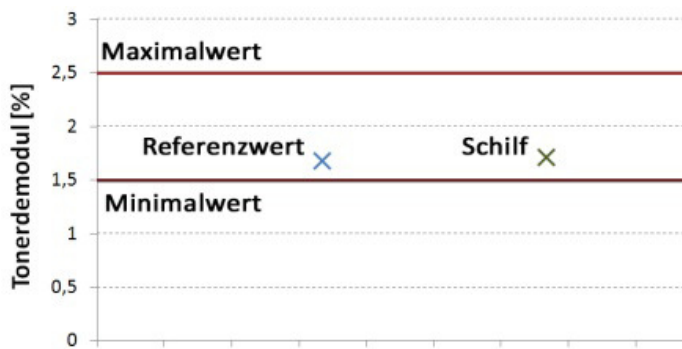


Abbildung 6-2: Qualitätskriterium Tonerdemodul beim Einsatz von Schilf

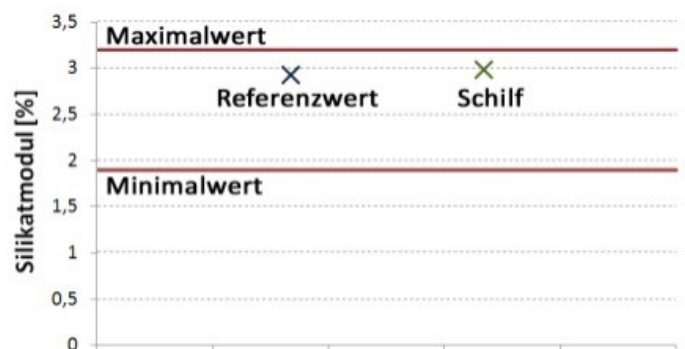


Abbildung 6-3: Qualitätskriterium Silikatmodul beim Einsatz von Schilf

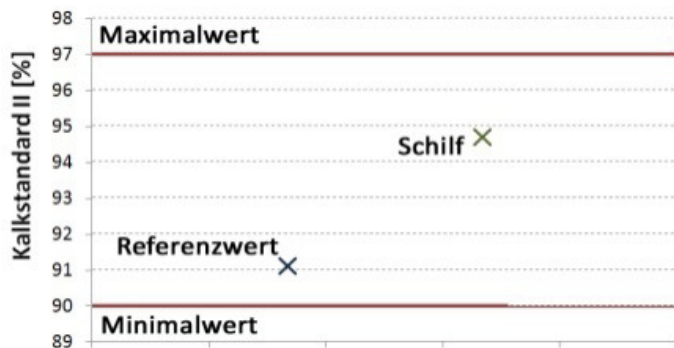


Abbildung 6-4: Qualitätskriterium Kalkstandard II beim Einsatz von Schilf

6.1.2.2 Auswirkungen auf die Prozessführung

Zur Beurteilung des Einflusses des Schilfs auf die Prozessstabilität wurde der Temperaturverlauf im Calcinator betrachtet. Die Temperatur im Calcinator ist ein Indikator dafür, ob der Brennprozess stabil abläuft. Bei einem Gleichgewicht zwischen abgeführter Wärme (z. B. Brennen von Klinker) und zugeführter Wärme (z. B. Verbrennungsvorgang) bleibt die Temperatur im Ofen unverändert.

Bei Betrachtung der Schwankungen des Temperaturverlaufs im Calcinator fiel auf, dass im Fall des Einsatzes von Schilf als alternativem Brennstoff im Vergleich zum Einsatz des Standard-Brennstoffmix deutlich geringere Schwankungen des Temperaturverlaufs auftraten.

6.1.2.2.3 Auswirkungen auf die gasförmigen Emissionen

Auf Basis der standardmäßig kontinuierlich aufgezeichneten Emissionswerte lassen sich aufgrund kurz vor und während des Langzeitversuchs aufgetretener – aber nicht auf den Einsatz von Schilf als Alternativbrennstoff zurückzuführender - Prozessinstabilitäten hinsichtlich der gasförmigen Emissionen keine quantifizierbaren Auswirkungen festhalten.

Ein qualitativer Vergleich zeigt jedoch beim Schilfverbrennungsversuch im Vergleich zum Einsatz des Standardbrennstoffs eine verminderte Messwerte folgender gasförmiger Emissionen:

- CO-Konzentration (Calcinator)
- CO-Konzentration (Kamin)
- NO_x-Konzentration (Kamin)
- Staub-Konzentration (Kamin)

Neben der Betrachtung der gasförmigen Emissionen im Verbrennungsprozess ist der Aspekt der Staubemissionen im Bereich der Brennstoff-Manipulation von wesentlicher (insbesondere sicherheitstechnischer) Bedeutung. Hier muss festgehalten werden, dass es mit der zum Zeitpunkt des Langzeitverbrennungsversuchs aktuell vorliegenden Anlagentechnik am Zementwerk Mannersdorf zu einer starken Staubentwicklung bei der Manipulation des Schilfs (Abladen vom LKW, Brennstoffförderung) kam. In Verbindung mit der damit verbundenen Staubexplosionsgefahr musste der Langzeitversuch nach ca. 36 Stunden abgebrochen werden.

Eine konkret in Umsetzung befindliche anlagentechnische Änderung im Bereich der Brennstoffbeschickung (Dosierstation mit direkter Beschickung des Pipe Conveyors aus Container) lässt eine Behebung dieses Problems erwarten.

6.1.2.3 Diskussion und Zusammenfassung

Die vorangehenden Ausführungen zeigen, dass Schilf als Alternativbrennstoff in der Primärfeuerung der Zementproduktion eher ungeeignet ist, da dies aufgrund der geringen Energiedichte des Schilfs die Einhaltung der Prozesstemperaturen erschwert und einer Zufeuerung von hochkalorischen Brennstoffen bedarf. Demgegenüber konnte gezeigt werden, dass der Einsatz von Schilf als Alternativbrennstoff im Calcinator aus prozesstechnischer Hinsicht problemlos möglich ist. Sowohl hinsichtlich der Prozessstabilität als auch der Produktqualität und der gasförmigen Prozessemissionen lassen sich keine negativen Auswirkungen ableiten. Als limitierend erwiesen sich die Staubemissionen im Zusammenhang mit der Schilfmanipulation (Brennstoffbeschickung und -förderung).

6.1.3 Ökologische Bewertung

Die ökologische Bewertung der Verwertung von Schilf in der Zementindustrie wird mit dem Brennstoff Petrolkoks, den es ersetzen soll, verglichen. Es wird die Wirkkategorie Treibhauspotential (100 Jahre) für beide berechnet. Die Berechnung inkludiert die Bereitstellungskette der Brennstoffe, deren Transport zum Zementwerk und die thermische Nutzung. Bei der thermischen Nutzung fließen ausschließlich die CO₂-Emissionen aus der Verbrennung mit ein. Belastungen aus der Herstellung der Infrastrukturherstellung im Zementwerk sind nicht inkludiert. Die Ergebnisse (Tabelle 6-2) sind auf 1MJ

abgegebene Wärme bezogen und stellen die Verbesserung bzw. die zusätzlichen Emissionen dar, die durch die Substitution von Petrolkoks durch Schilf entstehen. Für die Bereiche Brennstoffbereitstellung und Transport entstehen durch die Nutzung von Schilf vergleichsweise höhere Emissionen. Der Grund dafür ist, dass es sich bei der Erntetechnik um keine Massenproduktion handelt und die Technik noch einigen Verbesserungsbedarf hat. Was jedoch den ausschlaggebenden Einfluss hat, ist der wesentlich geringere Heizwert. Das bedeutet, dass man um denselben Energieoutput (1MJ Wärme) zu liefern, wesentlich mehr Brennstoff bereitgestellt werden muss. Das schlägt sich in den Bereitstellungs- und Transportaufwendungen nieder, die direkt von der Brennstoffmenge abhängen. Bei der thermischen Nutzung (Verbrennung) entsteht ein sehr großes Einsparpotential bei der Nutzung von Schilf, da der fossile Brennstoff Petrolkoks hier vergleichsweise große Belastungen mitbringt. Die Emissionsminderung ist darauf zurückzuführen, dass der biogene Kohlenstoff mit Null verrechnet wird.

Tabelle 6-2: Ergebnisse ökologische Bewertung Schilfverwertung in der Zementindustrie; Wirkkategorie Treibhauspotential (100 Jahre); Bezug 1 [MJ] erzeugte Wärme

	Einheit	Veränderung Substitution Petrolkoks zu Schilf ¹⁾
Brennstoff Bereitstellung	[kg CO ₂ -Äqv.]	2,13E-02
Transport	[kg CO ₂ -Äqv.]	8,92E-03
Thermische Nutzung ²⁾	[kg CO ₂ -Äqv.]	-9,80E-02
Gesamt	[kg CO ₂ -Äqv.]	-6,77E-02

¹⁾ Positive Werte bedeuten zusätzliche Emissionen, negative Werte bedeuten Emissionsminderungen
²⁾ Emissionen aus Verbrennung, Belastungen aus Herstellung der Infrastruktur (Vorketten) inkludiert; CO₂ aus biog. Kohlenstoff im GWP 100 mit Null verrechnet

6.2 Thermische Verwertung – Wirbelschichtvergasung

6.2.1 Zielsetzungen, Materialien und Methodik

An der Technischen Universität Wien, am Institut für Verfahrenstechnik, steht eine Wirbelschichtvergasungsanlage mit 100 kW Brennstoffwärmeleistung zur Verfügung. Diese Anlage beruht auf dem Prinzip der Zweibettwirbelschicht Dampfvergasung (DFB), wobei überhitzter Dampf als Vergasungsmedium eingesetzt wird. Dieser Prozess wurde an der TU - Wien entwickelt und wird bereits seit ca. 10 Jahren sehr erfolgreich in Güssing (8 MW Brennstoffwärmeleistung Biomassevergasungsanlage) kommerziell eingesetzt.

6.2.1.1 Prinzip Zweibettwirbelschicht Dampfvergaser

Die Vergasung ist ein endothermer Prozess, d.h. es wird Energie benötigt um einen festen Brennstoff in ein gasförmiges Produktgas umzuwandeln. Diese Energie kann auf unterschiedliche Weise in das System eingetragen werden (Bridgwater et al., 2009). Im Falle des Zweibettwirbelschichtsystems wird dieser Energieeintrag durch ein zirkulierendes heißes Bettmaterial bewerkstelligt. Es gibt zwei getrennte Reaktoren (Vergasungsreaktor und Verbrennungsreaktor), welche über zwei Siphons miteinander verbunden sind. In dem Verbrennungsreaktor nimmt das Bettmaterial Wärme auf und transportiert diese in den Vergasungsreaktor. Die Siphons selbst werden mit Dampf fluidisiert, wodurch eine Leckage von

Luft bzw. Abgas vom Verbrennungsreaktor in den Vergasungsreaktor verhindert wird. Hingegen kann das Bettmaterial aber ungehindert transportiert werden, siehe dazu Abbildung 6-5.

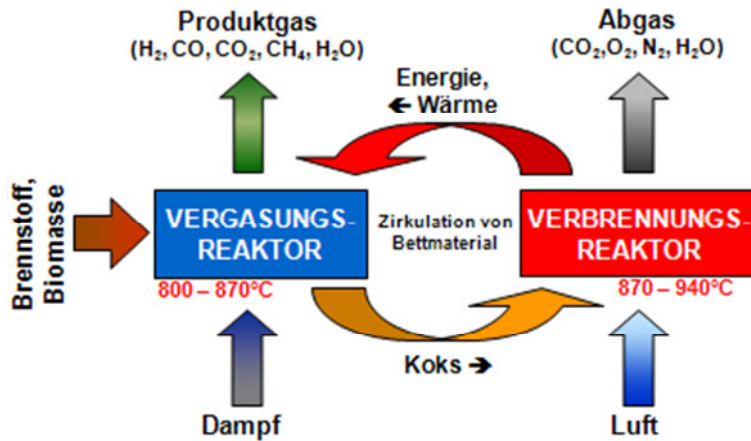


Abbildung 6-5: Prinzip der Zweibettwirbelschicht Vergasungsanlage

6.2.1.2 100 kW Zweibettwirbelschicht Dampfvergaser

Abbildung 6-6 zeigt ein Fließbild des Zweibettwirbelschicht Dampfvergasers am Institut für Verfahrenstechnik an der TU – Wien.

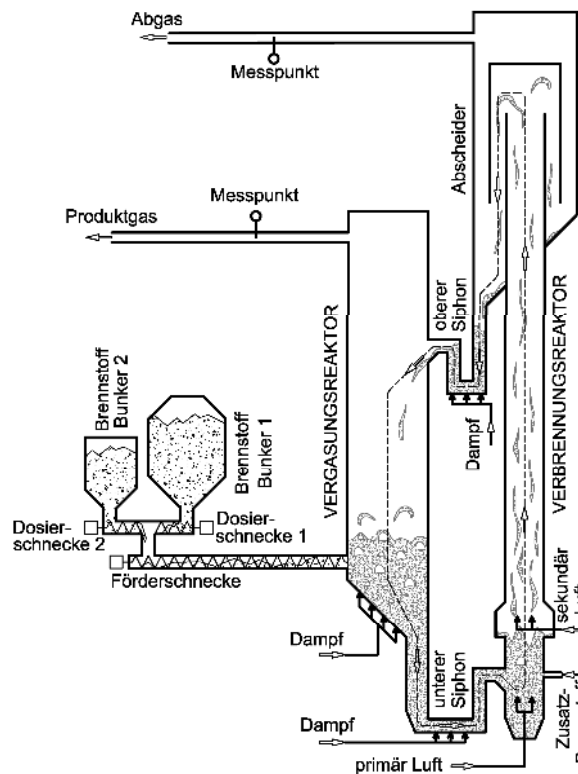


Abbildung 6-6: Zweibettwirbelschicht Dampfvergaser, TU – Wien (Technikumsanlage)

Der Brennstoff wird aus Bunkern über Förderschnecken in den Vergasungsreaktor gefördert. Diese Bunker sind gasdicht verschlossen und werden zusätzlich mit einem Stickstoffstrom mit einer Zuflussrate von je 100 l/h inertisiert. Die Einstellung des Massenstroms erfolgt durch eine frequenzgesteuerte

Schnecke, welche vor jedem Versuch auf jeden Brennstoff individuell kalibriert wird. Für die beschriebene Versuchsserie erfolgt der Brennstoffeintrag direkt in das Wirbelbett im Vergasungsreaktor. Der Vergasungsreaktor wird mit Dampf als blasenbildende Wirbelschicht betrieben. Der Brennstoff wird zusammen mit dem Bettmaterial nach unten transportiert während der Brennstoff vollständig entgast. Der zurückbleibende Koks und das Bettmaterial gelangen durch den unteren Siphon in den Verbrennungsreaktor. Im Verbrennungsreaktor wird von unten Luft eingeblasen, sodass der eingetragene Koks zusammen mit einem Zusatzbrennstoff (an der Versuchsanlage Heizöl, industriell üblicherweise mittels geringem Produktgasstrom) verbrannt wird, um die Vergasungstemperatur zu regeln. Der Verbrennungsreaktor selbst ist eine „transportierende Wirbelschicht“, d.h. die Gasgeschwindigkeiten sind so hoch, dass der Koks und das Bettmaterial nach oben transportiert werden. Währenddessen wird der Koks verbrannt und die entstehende Verbrennungswärme wird an das Bettmaterial übertragen. Am Verbrennungsreaktorkopf sorgt ein Umlenkabscheider wieder für die Trennung von Feststoff und Gasphase. Das heiße Bettmaterial wird über einen weiteren Siphon zurück in den Vergasungsreaktor geleitet.

6.2.2 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Es wurden drei Versuche mit unterschiedlichen Schilf-Holz Mischungen durchgeführt. Um den Einfluss von Schilf auf die Vergasungsreaktionen zu ermitteln wurde zuerst ein Blindversuch mit 100% Weichholzpellets durchgeführt. Die weiteren Versuche wurden mit 50%/50% Schilf/Holz und 100% Schilf gemacht. Die Prozentangaben beziehen sich auf Energie-%, d.h. bei 50%/50% kommt 50% der Energie aus Schilf und 50% aus Holz.

Die Versuchsbedingungen wurden jeweils so gewählt, dass sie den Betrieb in einer großtechnischen Anlage widerspiegeln. Die eingestellten Parameter sind in Tabelle 6-3 dargestellt.

Tabelle 6-3: Parameter für die Vergasungsversuche

Parameter	Einheit	Wert
Vergasungstemperatur	[°C]	850
Fluidisierungsmittel, Vergasungsreaktor	[-]	Dampf
Bettmaterial	[-]	Olivin
Bettmaterialmenge	[kg]	100
Partikelgröße, Bettmaterial	[mm]	0,4 – 0,6
Brennstoffinput, Leistung	[kW]	100
Dampf - Kohlenstoff Verhältnis ¹⁾	[kg/kg]	1,5
Dampf – Brennstoff Verhältnis ²⁾	[kg/kg _{daf}]	0,7
¹⁾ Dampf – Kohlenstoff Verhältnis = $\frac{\text{Dampfmenge+Wasser von Brennstoff}}{\text{Kohlenstoffinput von Brennstoff}}$		
²⁾ Dampf – Brennstoff Verhältnis = $\frac{\text{Dampfmenge+Wasser von Brennstoff}}{\text{Brennstoffmenge wasserfrei}}$		

6.2.2.1 Produktgaszusammensetzung

In Abbildung 6-7 sind die Hauptkomponenten des trockenen Produktgases dargestellt. Es ist ersichtlich, dass der Wasserstoffanteil und der Kohlendioxidanteil leicht sinken, wogegen die anderen Komponenten

leicht steigen. Im Allgemeinen zeigt dieser Trend, dass der Brennstoff schlechter mit dem Dampf reagiert. Das widerspiegelt auch der Wassergehalt im Produktgas, dieser steigt von 38% (0% Schilf) auf 45% (100% Schilf) bzw. die Wasserumsatzrate, welche von 15,6% auf 11% sinkt.

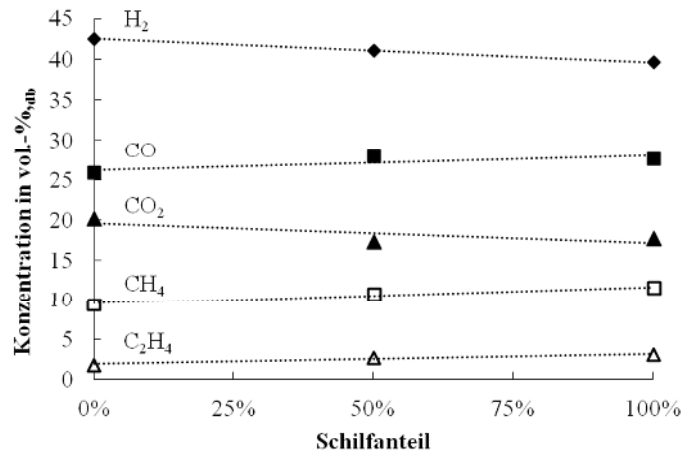


Abbildung 6-7: Produktgaszusammensetzung in Abhängigkeit vom Schilfanteil im Brennstoff

6.2.2.2 Unerwünschte Komponenten im Produktgas

Unter unerwünschte Komponenten werden die Stoffe Ammoniak (NH₃), Schwefelwasserstoff (H₂S), Chlorwasserstoff (HCl) und Teere (GC/MS und gravimetrisch) im Produktgas verstanden. Aus Abbildung 6-8 und Abbildung 6-9 ist sehr deutlich ersichtlich, dass die Werte für H₂S, NH₃, HCl und Teer im Produktgas mit steigendem Schilfanteil im Brennstoff steigen. In Abbildung 6-9 kann der Anstieg der Teere durch die geringeren Umsatzraten mit Wasser erklärt werden, dadurch werden weniger Kohlenwasserstoffe gespalten und es bleiben mehr höhere Kohlenwasserstoffe im Produkt erhalten.

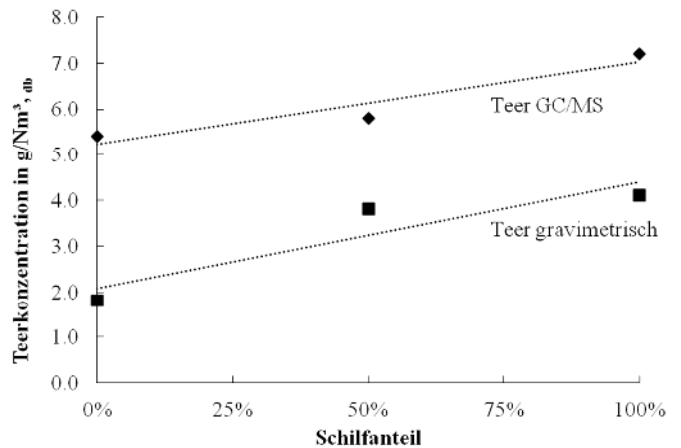
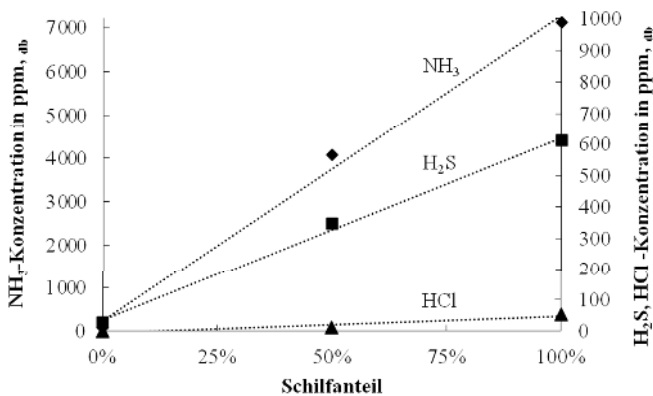


Abbildung 6-8: Emissionen in Abhängigkeit vom Schilfanteil
Abbildung 6-9: Teerwerte im Produktgas

6.2.3 Ökologische Bewertung

Die ökologische Bewertung der Vergasung von Schilf und Holz in der Wirbelschichtvergasung und anschließender Nutzung im Verbrennungsmotor wird mit der Nutzung von Erdgas in einem BHKW

verglichen. Es werden die Wirkkategorien Treibhauspotential (100 Jahre), Humantoxizität, Versauerungspotential und Ozonabbaupotential für die Varianten berechnet. Die Berechnung inkludiert die Bereitstellungskette der Inputstoffe (dies gilt ebenfalls für Erdgas), deren Transport zur Vergasungsanlage, die Vergasung an sich und die Nutzung im Verbrennungsmotor. Für den gesamten Verwertungsweg sind für alle Varianten die Umweltbelastungen aus der zur Verfügung Stellung der Infrastruktur anteilig inkludiert. Dies kann für die Variante Holz zu Schilf aufgeschlüsselt dargestellt werden. Bei der Substitution von Erdgas durch Schilf kann lediglich der Gesamtwert dargestellt werden. Der Verbrennungsmotor und das BHKW erzeugen elektrische Energie und thermische Energie. Als funktionelle Einheit ist 1 MJ thermische Energie definiert. Für den ebenfalls erzeugten elektrischen Strom wird eine Gutschrift berechnet. Dazu werden die Umweltbelastungen aus dem durchschnittlichen österreichischen Erzeugermix berechnet und abgezogen. Die Ergebnisse sind in den Tabelle 6-4 bis Tabelle 6-8 als Veränderung für die einzelnen Abschnitte des Verwertungsweges bzw. für den Gesamtwert dargestellt. Die Ergebnisse sind auf 1MJ abgegebene Wärme bezogen.

Die Veränderungen durch die jeweilige Substitution zeigt, dass es in den betrachteten Wirkkategorien mehr Vorteile bringt fossile Energieträger durch Schilf zu substituieren als andere Erneuerbare, wie Holz. Die Veränderung bei der Substitution von Holz durch Schilf ergibt sich unter andern aus den vermehrten Aufwendungen bei der Bereitstellung, der größeren Feinstaubbelastung sowohl bei der Ernte als auch bei der thermischen Nutzung und dem höheren Stickstoff- und Schwefelgehalt im Brennstoff Schilf. Neben der unterschiedlichen Erntetechnologie und der niedrigen Flächenleistung bei der Schilfernte kommt es in allen Wirkkategorien bei der Brennstoff Bereitstellung zu einer Erhöhung der Belastungen im Vergleich zur Bereitstellung von Holzhackgut. Ausgenommen ist die Wirkkategorie Humantoxizität, hier bringt der Prozess der Hackgutbereitstellung höhere Schwermetallbelastungen mit sich. Die relativ höhere Feinstaubbelastung bei der Bereitstellung und Verbrennung von Schilf, im Vergleich zur Nutzung von Erdgas im BHKW zeigt sich in höheren Belastungen in den Wirkkategorien Feinstaubbildung (Tabelle 6-8) und Humantoxizität (Tabelle 6-5).

Tabelle 6-4: Ergebnisse ökologische Bewertung Holz- und Schilfverwertung in der Wirbelschichtvergasung mit anschließender Nutzung im Verbrennungsmotor, sowie Erdgasnutzung im BHKW; Wirkkategorie Treibhauspotential (100 Jahre); Bezug 1 [MJ] erzeugte Wärme

	Einheit	Veränderung Substitution Holz zu Schilf ¹⁾	Veränderung Substitution Erdgas zu Schilf ¹⁾
Brennstoff Bereitstellung	[kg CO ₂ -Äqv.]	4,42E-03	
Transport zur Vergasungsanlage	[kg CO ₂ -Äqv.]	6,12E-04	
Lagerung vor Ort	[kg CO ₂ -Äqv.]	1,30E-03	
Vergasungsprozess	[kg CO ₂ -Äqv.]	0,00E+00	
Thermische Nutzung ²⁾	[kg CO ₂ -Äqv.]	0,00E+00	
Gesamt	[kg CO ₂ -Äqv.]	7,34E-03	-1,45E-01

¹⁾ Positive Werte bedeuten zusätzliche Emissionen, negative Werte bedeuten Emissionsminderungen
²⁾ Emissionen aus Verbrennung, Belastungen aus Herstellung der Infrastruktur (Vorketten) inkludiert; CO₂ aus biog. Kohlenstoff im GWP 100 mit Null verrechnet

Tabelle 6-5: Ergebnisse ökologische Bewertung Holz- und Schilfverwertung in der Wirbelschichtvergasung mit anschließender Nutzung im Verbrennungsmotor, sowie Erdgasnutzung im BHKW; Wirkkategorie Humantoxizitätspotential; Bezug 1 [MJ] erzeugte Wärme

	Einheit	Veränderung Substitution Holz zu Schilf ¹⁾	Veränderung Substitution Erdgas zu Schilf ¹⁾
Brennstoff Bereitstellung	[kg DCB-Äqv.]	-5,04E-04	
Transport zur Vergasungsanlage	[kg DCB-Äqv.]	2,66E-04	
Lagerung vor Ort	[kg DCB-Äqv.]	5,76E-04	
Vergasungsprozess	[kg DCB-Äqv.]	-2,12E-06	
Thermische Nutzung ²⁾	[kg DCB-Äqv.]	1,57E-05	
Gesamt	[kg DCB-Äqv.]	3,52E-04	3,91E-03
¹⁾ Positive Werte bedeuten zusätzliche Emissionen, negative Werte bedeuten Emissionsminderungen ²⁾ Emissionen aus Verbrennung, Belastungen aus Herstellung der Infrastruktur (Vorketten) inkludiert			

Tabelle 6-6: Ergebnisse ökologische Bewertung Holz- und Schilfverwertung in der Wirbelschichtvergasung mit anschließender Nutzung im Verbrennungsmotor, sowie Erdgasnutzung im BHKW; Wirkkategorie Versauerungspotential; Bezug 1 [MJ] erzeugte Wärme

	Einheit	Veränderung Substitution Holz zu Schilf ¹⁾	Veränderung Substitution Erdgas zu Schilf ¹⁾
Brennstoff Bereitstellung	[kg SO ₂ -Äqv.]	4,57E-05	
Transport zur Vergasungsanlage	[kg SO ₂ -Äqv.]	8,81E-06	
Lagerung vor Ort	[kg SO ₂ -Äqv.]	1,07E-05	
Vergasungsprozess	[kg SO ₂ -Äqv.]	6,52E-06	
Thermische Nutzung ²⁾	[kg SO ₂ -Äqv.]	1,08E-05	
Gesamt	[kg SO ₂ -Äqv.]	8,25E-05	-1,80E-05
¹⁾ Positive Werte bedeuten zusätzliche Emissionen, negative Werte bedeuten Emissionsminderungen ²⁾ Emissionen aus Verbrennung, Belastungen aus Herstellung der Infrastruktur (Vorketten) inkludiert			

Tabelle 6-7: Ergebnisse ökologische Bewertung Holz- und Schilfverwertung in der Wirbelschichtvergasung mit anschließender Nutzung im Verbrennungsmotor, sowie Erdgasnutzung im BHKW; Wirkkategorie Ozonabbaupotential (katalytisches); Bezug 1 [MJ] erzeugte Wärme

	Einheit	Veränderung Substitution Holz zu Schilf ¹⁾	Veränderung Substitution Erdgas zu Schilf ¹⁾
Brennstoff Bereitstellung	[kg R11-Äqv.]	6,56E-10	
Transport zur Vergasungsanlage	[kg R11-Äqv.]	2,61E-10	
Lagerung vor Ort	[kg R11-Äqv.]	9,57E-11	
Vergasungsprozess	[kg R11-Äqv.]	0,00E+00	
Thermische Nutzung ²⁾	[kg R11-Äqv.]	0,00E+00	
Gesamt	[kg R11-Äqv.]	1,01E-09	-2,22E-08
¹⁾ Positive Werte bedeuten zusätzliche Emissionen, negative Werte bedeuten Emissionsminderungen ²⁾ Emissionen aus Verbrennung, Belastungen aus Herstellung der Infrastruktur (Vorketten) inkludiert			

Tabelle 6-8: Ergebnisse ökologische Bewertung Holz- und Schilfverwertung in der Wirbelschichtvergasung mit anschließender Nutzung im Verbrennungsmotor, sowie Erdgasnutzung im BHKW; Feinstaubbildung; Bezug 1 [MJ] erzeugte Wärme

	Einheit	Veränderung Substitution Holz zu Schilf ¹⁾	Veränderung Substitution Erdgas zu Schilf ¹⁾
Brennstoff Bereitstellung	[kg PM10-Äqv.]	2,41E-05	
Transport zur Vergasungsanlage	[kg PM10-Äqv.]	4,11E-06	
Lagerung vor Ort	[kg PM10-Äqv.]	4,37E-06	
Vergasungsprozess	[kg PM10-Äqv.]	7,75E-07	
Thermische Nutzung ²⁾	[kg PM10-Äqv.]	3,55E-06	
Gesamt	[kg PM10-Äqv.]	3,69E-05	8,63E-05

¹⁾ Positive Werte bedeuten zusätzliche Emissionen, negative Werte bedeuten Emissionsminderungen
²⁾ Emissionen aus Verbrennung, Belastungen aus Herstellung der Infrastruktur (Vorketten) inkludiert

6.3 Thermische Verwertung – Verbrennung Großanlage

6.3.1 Zielsetzungen, Materialien und Methodik

Ziel der Versuche ist die Evaluierung des Einsatzes von Schilf in herkömmlichen Biomasse-Hackgutkesseln (Leistungsbereich 3 MW), wie sie in Nah- und Fernwärmanlagen zum Einsatz kommen. Der Brennstoff Schilf wurde gehäckselt mit einem LKW angeliefert und anschließend mit einem Radlader in den Bunker befördert. Für eine gute Vermischung im Bunker sorgt erstens der Radlader und zweitens ein Schubboden welcher im 90° Winkel zu der Beschickung der Brennkammer angeordnet ist. Die Beschickung ist ebenfalls ein Schubboden, welcher wie ein Stempel den Brennstoff in die Brennkammer drückt. Ein vereinfachtes Fließbild der Verbrennungsanlage ist in Abbildung 6-10 dargestellt.

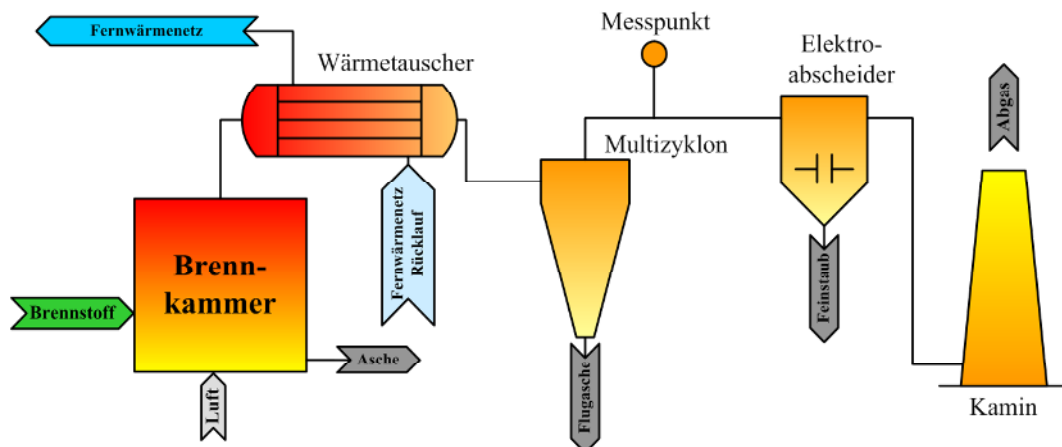


Abbildung 6-10: Vereinfachtes Fließbild der Verbrennungsanlage

In der Brennkammer fällt der Brennstoff auf einen sogenannten Treppenrost und wird stufenweise verbrannt. Des Weiteren ist eine Rauchgasrezirkulation installiert. Diese bewerkstelligt geringe Emissionswerte bei der Verbrennung. Nach der Brennkammer strömt das ca. 900°C heiße Abgas in den

Wärmeaustauscher und gibt die Wärme an das Fernwärmenetz ab. Dabei kühlt das Abgas auf ca. 200°C ab. Das Abgas wird in einem Multizyklon und in einem Elektroabscheider von Grob- und Feinasche gereinigt. Das gereinigte Abgas, bestehend hauptsächlich aus N₂, CO₂, H₂O und O₂, gelangt über einen Kamin in die Atmosphäre. Die abgetrennte Flugasche, sowie die Asche aus der Brennkammer werden über ein Schnecken- und Förderbandsystem gesammelt und ausgetragen.

Der Messpunkt, an dem die Abgasmessungen durchgeführt wurden, liegt untypischerweise zwischen Multizyklon und Elektroabscheider. Normalerweise liegt der Messpunkt direkt vor dem Kamin. Der Elektroabscheider wurde aber erst später angebaut und dadurch ist das Stück zwischen Elektroabscheider und Kamin sehr schlecht zugänglich. Aus dieser Notwendigkeit heraus ergibt sich, dass die gemessenen Staubwerte im Abgas nicht mit den Staubemissionen des Heizwerkes übereinstimmen. Die tatsächlichen Staubemissionen sind wesentlich geringer. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die anderen gemessenen Emissionen durch den Elektroabscheider nicht beeinflusst werden und daher die Richtigkeit der Messungen gegeben ist.

6.3.2 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Versuche wurden im Zuge einer Versuchskampagne, welche über 4 zusammenhängende Tage gemacht wurde, durchgeführt.

Um die Ergebnisse aus den Schilfversuchen mit dem Standard Betrieb des Heizwerkes vergleichen zu können, wurde ein Blindversuch mit Holz – Hackschnitzeln durchgeführt. Des Weiteren wurden Versuche mit 30% Schilf, 50% Schilf und 100% Schilf durchgeführt. Die Prozentangaben beziehen sich dabei auf den Energieinhalt von Brennstoff bezogen auf den Heizwert.

6.3.2.1 Versuchsauswertung

Während des Versuchstages wurden die Anlagenparameter und die Abgasmessungen aufgezeichnet. Bei der Versuchsauswertung wurde nun versucht einen möglichst konstanten Bereich, bei hoher Leistung, für die Mittelwertbildung heranzuziehen. Bei den diskontinuierlichen Messmethoden konnte auf die Betriebsbedingungen nur begrenzt eingegangen werden, z.B. die Messung von Dioxinen und Furanen benötigt 6 Stunden, somit sind gewisse Schwankungen im Betrieb der Anlage bei der Messung nicht auszuschließen. Im Gesamten widerspiegeln diese Werte allerdings sehr gut die Emissionen die durch den eingesetzten Brennstoff entstehen.

Über den gewählten Bereich wurde nun der Mittelwert als repräsentativer Wert für diesen Versuch gebildet. In Abbildung 6-11 und Abbildung 6-12 sind die Verläufe wesentlicher Messwerte exemplarisch für den 2. Versuchstag graphisch dargestellt.

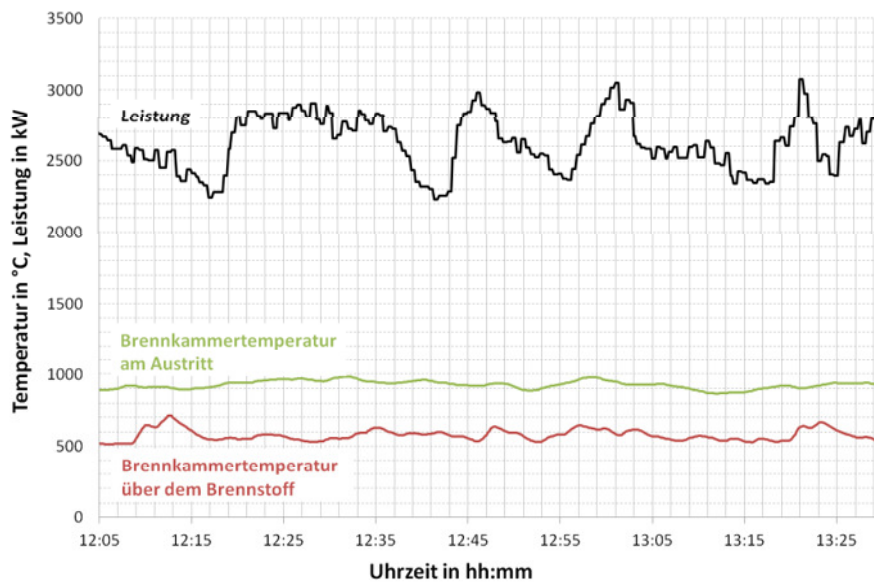


Abbildung 6-11: Konstanter Bereich für die Mittelwertbildung, 2.Versuchstag, 12:05 – 13:30

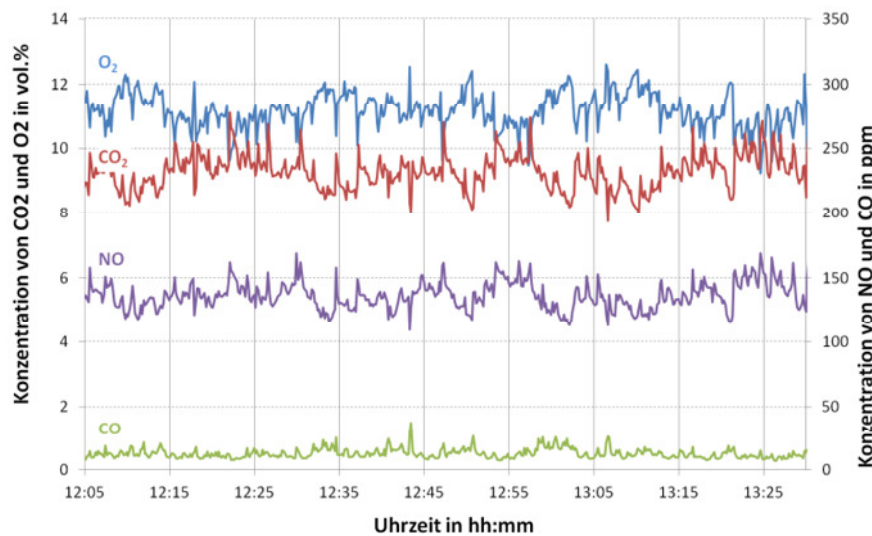


Abbildung 6-12: Konstanter Bereich für Mittelwertbildung, 2.Versuchstag, 12:05 – 13:30

6.3.2.2 Versuchsergebnisse

In Tabelle 6-9 sind die Ergebnisse von den Versuchen mit den unterschiedlichen Brennstoffmischungen zusammengefasst. Da die Werte mit 100% Schilf auf einer Messzeit von nur 17 min basieren, handelt es sich eher um Richtwerte und nicht um Messergebnisse im eigentlichen Sinn. Der Grund für diese kurze Messzeit ist, dass es bei der Förderung von 100% Schilf zu Problemen gekommen ist und deshalb die Anlage nicht unter konstanten Betriebsbedingungen betrieben werden konnte.

Tabelle 6-9: Rohdaten von den Abgaswerten

Messwert	Einheit	100% Holz - Hackschnitzel	30% Schilf – 70% Holz - Hackschnitzel	50% Schilf – 50% Holz - Hackschnitzel	100% Schilf
Versuchsdauer für Mittelwertbildung	[min]	105	60	130	17
Leistung	[kW]	2800 ± 390	2660 ± 180	2630 ± 240	2510 ± 290
Feuerraumtemperatur am Austritt	[°C]	868 ± 27	836 ± 18	934 ± 31	775 ± 50
O ₂ – Gehalt	[vol%]	12,2 ± 0,5	11,5 ± 0,6	11,2 ± 0,7	14,7 ± 0,8
CO ₂ – Gehalt	[vol%]	8,1 ± 0,5	8,9 ± 0,6	9,20 ± 0,6	5,7 ± 0,8
CO – Gehalt	[ppm]	30 ± 12	29 ± 10	14 ± 7,5	50 ± 25
NO – Gehalt	[ppm]	146 ± 12,5	119 ± 12,5	135 ± 13	93 ± 21
NO ₂	[ppm]	3,7 ± 0,9	1,7 ± 0,3	2,8 ± 0,7	4,7 ± 1,6
SO ₂	[ppm]	7,1 ± 2,6	14,4 ± 1,7	24,8 ± 3,2	35,5 ± 5,3
C org	[ppm]	1,0 ± 0,4	2,7 ± 4,7	0,6 ± 0,6	0,6 ± 0,2
HCl	[ppm]	0,7 ± 0,1	1,2 ± 0,7	1,6 ± 0,5	39,0
HF	[ppm]	0,8 ± 0,5	1,1 ± 0,2	0,8 ± 0,1	0,7

Die Abgaswerte von SO₂, HCl und HF sind sehr stark vom Brennstoff abhängig, da der eingebrachte Schwefel hauptsächlich als SO₂ aus dem Heizwerk emittiert wird. Analoges gilt für Chlor und Fluor als HCl und HF. Es ist klar ersichtlich, dass diese Werte mit steigendem Anteil an Schilf durch höhere Werte im Brennstoff ansteigen.

Die Emissionen durch CO und NO hingegen beruhen hauptsächlich auf den Verbrennungsbedingungen. Allgemein gilt, dass der CO-Gehalt bei steigender Verbrennungstemperatur sinkt, und der NO Gehalt hingegen steigt. Aus Tabelle 6-9 sind diese Trends klar ersichtlich. z.B. ist der CO Gehalt bei 850 °C Verbrennungstemperatur ca. 30 ppm und bei 930 °C nur mehr 14 ppm.

Um diese Werte nun mit anderen Anlagen bzw. mit den Grenzwerten in der Norm vergleichen zu können, müssen sie auf einen genormten Sauerstoffanteil umgerechnet werden, siehe Tabelle 6-10.

Tabelle 6-10: Emissionswerte bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 13,0 [Vol%]

Messwert	Einheit	100% Holz - Hackschnitzel	30% Schilf – 70% Holz - Hackschnitzel	50% Schilf – 50% Holz - Hackschnitzel	100% Schilf
CO – Gehalt	[mg/m _N ³]	33,7	30,2	14,4	80,2
NO – Gehalt	[mg/m _N ³]	178	134	149	158
NO ₂	[mg/m _N ³]	4,5	2,0	3,0	8,0
Summe NO und NO ₂ als NO ₂ gerech.	[mg/m _N ³]	277	207	231	251
SO ₂	[mg/m _N ³]	8,7	16,3	27,3	60,8
C org	[mg/m _N ³]	1,2	3,0	0,7	1,1
HCl	[mg/m _N ³]	0,8	1,4	1,7	66,7
HF	[mg/m _N ³]	0,9	1,2	0,9	1,2
Staub	[mg/m _N ³]	209	71	85	n.a.*
Hg	[mg/m _N ³]	0,0004	0,0004	0,0004	n.a.*
Σ Cd, TI	[mg/m _N ³]	0,006	0,007	0,007	n.a.*
Σ (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn)	[mg/m _N ³]	0,489	0,127	0,165	n.a.*
Σ PAK (EPA – 16)	[µg/m _N ³]	8,7	54	2,7	n.a.*
Dioxine und Furane nach I-TEF	[ngTE ⁺ /m _N ³]	0,0276	0,0092	0,0307	n.a.*
* n.a. ... nicht analysiert ngTE... Nanogramm Toxizitätsäquivalent					

6.3.2.3 Interpretation der Ergebnisse

In diesem Kapitel wird allgemein auf die Beobachtungen und Messergebnisse der gesamten Versuchskampagne eingegangen.

- Die Versuche haben aus Sicht der Anlagenbetreiber gut funktioniert. Bis zu einem Energieanteil von 50% Schilf ist keine merkwürdige Änderung des Betriebsverhaltens des Heizwerkes aufgefallen. Aus den Beobachtungen des Betriebspersonals, ist den Zusatz von Schilf im Anlagenbetrieb kaum merkbar.
- Die Brennstoffförderung ist auf Holz – Hackschnitzel ausgelegt. Da das gehäckselte Schilf sehr leicht und faserig ist, kam es bei reiner Schilfbeschickung zu Problemen in der Brennstoffförderung. Jedoch bis zu einem Brennstoffanteil bezogen auf den Energieinhalt von 50% war die Förderung unproblematisch. Möchte man die Heizanlage mit reinem Schilf betreiben, so müsste das Fördersystem adaptiert werden.
- Der relativ hohe Ascheanteil von Schilf in Bezug auf Holz führt dazu, dass das obere Sichtfenster der Brennkammer sehr schnell mit Asche verdeckt war. Zu Verklebungen oder Anpackungen in der Brennkammer ist es nicht gekommen, da die Ascheerweichungstemperatur von Schilf höher ist, als die von Holz.

- Mit erhöhtem Schilfanteil erhöht sich auch der Anteil an HCl im Abgas und das kann wiederum den Dioxin – Gehalt im Abgas erhöhen. Bei den Versuchen war der Dioxingehalt immer klar unter den gesetzlich vorgeschriebenen Grenzen ($0,1 \text{ ngTE/m}_N^3$). Dies gilt sowohl für Feuerungsanlagen für biogene, feste Brennstoffe, sowie für Abfallverbrennungsanlagen nach der Abfallverbrennungsverordnung (AVV, 2010).

6.3.3 Ökologische Bewertung

Die ökologische Bewertung der thermischen Verwertung von Schilfhäckselgut in der Großanlage wird mit Holzhäckselgut aber auch mit den beiden fossilen Energieträgern Heizöl EL und Erdgas in Industrief Feuerungen verglichen. Es werden die Wirkkategorien Treibhauspotential (100 Jahre), Humantoxizität, Versauerungspotential und Ozonabbaupotential für die genannten Technologien berechnet. Außerdem erfolgt eine Abschätzung der Feinstaubbildung für die Verfahren. Die Berechnung inkludiert die Bereitstellungskette der Inputstoffe, deren Transport zur Anlage und die thermische Verwertung im Großkessel/Industriefeuerung. Für den gesamten Verwertungsweg sind die Umweltbelastungen aus der zur Verfügung Stellung der Infrastruktur anteilig inkludiert.

Die Ergebnisse sind in den Tabelle 6-11 bis Tabelle 6-15 für die einzelnen Abschnitte des Verwertungsweges getrennt dargestellt. Die Ergebnisse sind auf 1MJ abgegebene Wärme bezogen und stellen die Verbesserung bzw. die zusätzlichen Emissionen dar, die durch die Substitution entstehen. Da nicht angenommen werden kann, dass Schilf einen anderen erneuerbaren Energieträger ersetzt, ist der Vergleich zu Erdöl und Erdgas als potentielle zu ersetzende fossile Brennstoffe dargestellt. Durchwegs kann festgestellt werden, dass die Verwertung von Schilf im Vergleich zu Holz eine Verschlechterung in allen betrachteten Wirkkategorien aufweist, außer bei der Feinstaubbelastung, hier wurden für Holz höhere Werte gemessen. Auf Grund der unterschiedlichen Erntetechnologie und der niedrigen Flächenleistung bei der Schilfernte kommt es in allen Wirkkategorien bei der Brennstoff Bereitstellung zu einer Erhöhung der Belastungen im Vergleich zur Bereitstellung von Holzhackgut. Ausgenommen ist die Wirkkategorie Humantoxizität, hier bringt der Prozess der Hackgutbereitstellung höhere Schwermetallbelastungen mit sich. Die zusätzlichen Emissionen in der Wirkkategorie Versauerung (AP) sowohl bei der Substitution von Holz, Heizöl EL als auch Erdgas ist ein Resultat von hohen Stickstoffmonoxid Emissionen bei der Verbrennung von Schilf.

Tabelle 6-11: Ergebnisse ökologische Bewertung thermische Verwertung Holz- und Schilfhäckselgut in der Großanlage sowie Nutzwärmebereitstellung durch Heizöl EL und Erdgas in Industriefeuerung; Wirkkategorie Treibhauspotential (100 Jahre); Bezug 1 [MJ] erzeugte Wärme

	Einheit	Veränderung Substitution Holz zu Schilf ¹⁾	Veränderung Substitution Heizöl EL zu Schilf ¹⁾	Veränderung Substitution Erdgas zu Schilf ¹⁾
Brennstoff Bereitstellung	[kg CO ₂ -Äqv.]	9,83E-04		
Transport zur Großanlage	[kg CO ₂ -Äqv.]	4,19E-04		
Lagerung vor Ort	[kg CO ₂ -Äqv.]	3,21E-04		
Thermische Nutzung ²⁾	[kg CO ₂ -Äqv.]	1,31E-04		
Gesamt	[kg CO ₂ -Äqv.]	1,85E-03	-8,52E-02	-6,41E-02

¹⁾ Positive Werte bedeuten zusätzliche Emissionen, negative Werte bedeuten Emissionsminderungen
²⁾ Emissionen aus Verbrennung, Belastungen aus Herstellung der Infrastruktur (Vorketten) inkludiert; CO₂ aus biog. Kohlenstoff im GWP 100 mit Null verrechnet

Tabelle 6-12: Ergebnisse ökologische Bewertung thermische Verwertung Holz- und Schilfhäckselgut in der Großanlage sowie Nutzwärmebereitstellung durch Heizöl EL und Erdgas in Industriefeuerung; Wirkkategorie Humantoxizitätspotential; Bezug 1 [MJ] erzeugte Wärme

	Einheit	Veränderung Substitution Holz zu Schilf ¹⁾	Veränderung Substitution Heizöl EL zu Schilf ¹⁾	Veränderung Substitution Erdgas zu Schilf ¹⁾
Brennstoff Bereitstellung	[kg DCB-Äqv.]	-5,14E-04		
Transport zur Großanlage	[kg DCB-Äqv.]	6,88E-05		
Lagerung vor Ort	[kg DCB-Äqv.]	1,43E-04		
Thermische Nutzung ²⁾	[kg DCB-Äqv.]	8,72E-04		
Gesamt	[kg DCB-Äqv.]	5,70E-04	7,08E-04	6,94E-03

¹⁾ Positive Werte bedeuten zusätzliche Emissionen, negative Werte bedeuten Emissionsminderungen
²⁾ Emissionen aus Verbrennung, Belastungen aus Herstellung der Infrastruktur (Vorketten) inkludiert

Tabelle 6-13: Ergebnisse ökologische Bewertung thermische Verwertung Holz- und Schilfhäckselgut in der Großanlage sowie Nutzwärmebereitstellung durch Heizöl EL und Erdgas in Industriefeuerung; Wirkkategorie Versauerungspotential; Bezug 1 [MJ] erzeugte Wärme

	Einheit	Veränderung Substitution Holz zu Schilf ¹⁾	Veränderung Substitution Heizöl EL zu Schilf ¹⁾	Veränderung Substitution Erdgas zu Schilf ¹⁾
Brennstoff Bereitstellung	[kg SO ₂ -Äqv.]	1,40E-05		
Transport zur Großanlage	[kg SO ₂ -Äqv.]	2,28E-06		
Lagerung vor Ort	[kg SO ₂ -Äqv.]	2,65E-06		
Thermische Nutzung ²⁾	[kg SO ₂ -Äqv.]	1,57E-04		
Gesamt	[kg SO ₂ -Äqv.]	1,76E-04	9,08E-05	2,47E-04

¹⁾ Positive Werte bedeuten zusätzliche Emissionen, negative Werte bedeuten Emissionsminderungen
²⁾ Emissionen aus Verbrennung, Belastungen aus Herstellung der Infrastruktur (Vorketten) inkludiert

Tabelle 6-14: Ergebnisse ökologische Bewertung thermische Verwertung Holz- und Schilfhäckselgut in der Großanlage sowie Nutzwärmebereitstellung durch Heizöl EL und Erdgas in Industriefeuerung; Wirkkategorie Ozonabbaupotential (katal.); Bezug 1 [MJ] erzeugte Wärme

	Einheit	Veränderung Substitution Holz zu Schilf ¹⁾	Veränderung Substitution Heizöl EL zu Schilf ¹⁾	Veränderung Substitution Erdgas zu Schilf ¹⁾
Brennstoff Bereitstellung	[kg R11-Äqv.]	1,81E-10		
Transport zur Großanlage	[kg R11-Äqv.]	6,75E-11		
Lagerung vor Ort	[kg R11-Äqv.]	2,37E-11		
Thermische Nutzung ²⁾	[kg R11-Äqv.]	2,26E-11		
Gesamt	[kg R11-Äqv.]	2,95E-10	-1,27E-08	-9,39E-09

¹⁾ Positive Werte bedeuten zusätzliche Emissionen, negative Werte bedeuten Emissionsminderungen
²⁾ Emissionen aus Verbrennung, Belastungen aus Herstellung der Infrastruktur (Vorketten) inkludiert

Tabelle 6-15: Ergebnisse ökologische Bewertung thermische Verwertung Holz- und Schilfhäckselgut in der Großanlage sowie Nutzwärmebereitstellung durch Heizöl EL und Erdgas in Industriefeuerung; Feinstaubbildung; Bezug 1 [MJ] erzeugte Wärme

	Einheit	Veränderung Substitution Holz zu Schilf ¹⁾	Veränderung Substitution Heizöl EL zu Schilf ¹⁾	Veränderung Substitution Erdgas zu Schilf ¹⁾
Brennstoff Bereitstellung	[kg PM10-Äqv.]	7,38E-06		
Transport zur Großanlage	[kg PM10-Äqv.]	1,06E-06		
Lagerung vor Ort	[kg PM10-Äqv.]	1,08E-06		
Thermische Nutzung ²⁾	[kg PM10-Äqv.]	-3,84E-05		
Gesamt	[kg PM10-Äqv.]	-2,89E-05	6,67E-05	1,06E-04

¹⁾ Positive Werte bedeuten zusätzliche Emissionen, negative Werte bedeuten Emissionsminderungen
²⁾ Emissionen aus Verbrennung, Belastungen aus Herstellung der Infrastruktur (Vorketten) inkludiert

6.4 Thermische Verwertung – Verbrennung Kleinanlage

6.4.1 Zielsetzung, Materialien und Methodik

Zielsetzung der Untersuchungen ist die Beurteilung des Einsatzes von Schilfpellets in handelsüblichen Kleinf Feuerungsanlagen. Die Verbrennungsversuche werden in einem Hackgutkessel im Technikum der FH Burgenland an einem Kesselprüfstand durchgeführt. Zur Bewertung der Versuchsergebnisse wurden zusätzlich Tests mit Holzpellets und Waldhackgut durchgeführt, die als Referenzbrennstoffe dienen. Weiters wurden Verbrennungsversuche mit Mischungen aus Holz- und Schilfpellets durchgeführt. (Plank, 2013) (Krail, 2013)

6.4.1.1 Kesselprüfstand

Der Kesselprüfstand erfüllt die Vorgaben gemäß ÖNORM EN 303-5 (1999). Die Abbildung 6-13 zeigt den Prüfstand inklusive aller wichtigen Bestandteile.

Neben dem Kessel befindet sich ein Vorratsspeicher zur Lagerung des Versuchsbrennstoffes. Dieser wurde auf einer Plattformwaage aufgestellt, mit welcher der Brennstoffverbrauch über den Versuchszeitraum bestimmt wird. Die frei werdende Wärme kann in einem Pufferspeicher (Lastausgleichsspeicher) mit einem Volumen von 6 m³ gespeichert werden. Durch die Bestimmung der zugeführten Brennstoffwärmeleistung und der über das Hydrauliksystem abgeführten Wärmeleistung kann eine Bestimmung des Wirkungsgrades nach der direkten Methode erfolgen.

Die Entnahme des Messgases zur Bestimmung der gasförmigen Abgaskomponenten erfolgt aus dem Rauchrohr nach dem Kessel. Im Rauchrohr ist ebenso eine Messöffnung für die Staubmessung mittels Kaskadenimpaktor vorhanden.

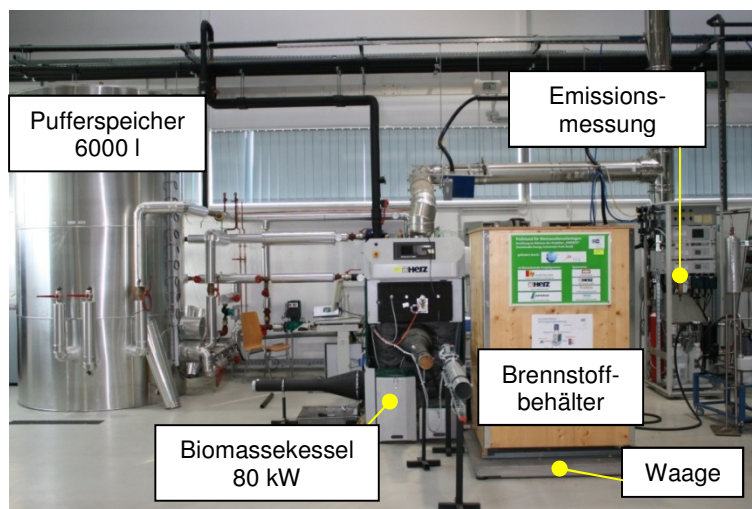


Abbildung 6-13: Kesselprüfstand für die Prüfung von Biomassekesselanlagen

Das Messtechnikkonzept basiert auf die Vorgaben der Norm ÖNORM EN 303-5 (1999) und wurde in einzelnen Punkten bedarfsgerecht adaptiert. In Tabelle 6-16 sind die wesentlichen Messpunkte und deren Messbereiche ersichtlich.

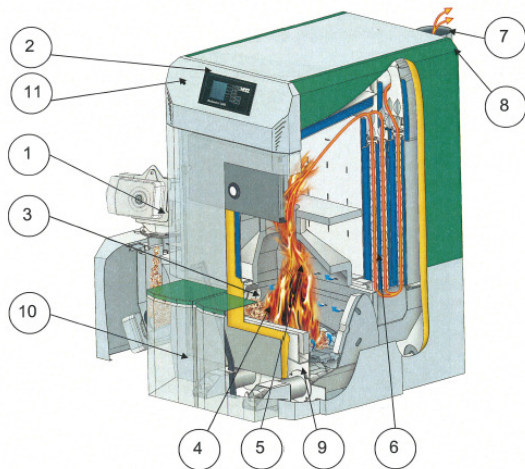
Tabelle 6-16: Wesentliche Messstellen am Kesselprüfstand

Messpunkt	Einheit	Sensor/Messprinzip	Messbereich
Massenstrom Rücklauf	[kg/h]	Coriolis-Massenstrommessgerät	100 - 18.000
Brennstoffmasse	[kg]	Plattformwaage	0 - 600
Temperatur Kesselvorlauf	[°C]	Widerstandsthermometer	-50 - 200
Temperatur Kesselrücklauf	[°C]	Widerstandsthermometer	-50 - 200
Abgastemperatur	[°C]	Thermoelement	0 - 1.250
Staubgehalt	[mg/m _N ³]	Kaskadenimpaktor	<2,5/2,5-10/>10 µm
O ₂ - Gehalt	[Vol. %]	Paramagnetismus	0 - 100
CO ₂ - Gehalt	[Vol. %]	Nicht dispersive Infrarotabsorption	0 - 30
CO - Gehalt	[ppm]	Nicht dispersive Infrarotabsorption	0 – 3.000
CH ₄ - Gehalt	[ppm]	Nicht dispersive Infrarotabsorption	0 - 3.000
NO - Gehalt	[ppm]	UV-Resonanzabsorptions-Spektroskopie	0 - 1.000
NO ₂ - Gehalt	[ppm]	UV-Resonanzabsorptions-Spektroskopie	0 - 500
SO ₂ - Gehalt	[ppm]	UV-Resonanzabsorptions-Spektroskopie	0 - 500
TOC - Gehalt	[ppm]	Flammenionisation	0 – 10.000

6.4.1.2 Installierter Kessel

Zur Durchführung der Verbrennungsversuche wurde ein Kessel der Firma HERZ Energietechnik GmbH mit einer Nennwärmeleistung von 80 kW installiert (siehe Abbildung 6-14). Dieser besitzt einen Treppenrost mit beweglichen Rostgliedern und ist sowohl für die Verfeuerung von Pellets als auch von Hackgut geeignet.

Mittels einer Förderschnecke wird der Brennstoff in die Brennkammer eingebracht. Die beweglichen Rostglieder sind für den Transport des Brennstoffes in Richtung Austragungsklappe verantwortlich. Ein drehzahlgeregeltes Saugzuggebläse fördert das Rauchgas über die Abgasverrohrung Richtung Kamin und ist ebenso für die Versorgung mit Verbrennungsluft verantwortlich. Die abschließende Lambda-Sonden-Messung ermittelt laufend den Restsauerstoffgehalt im Abgas, welcher für die Kesselregelung (Materialeinschub und Saugzugdrehzahl) herangezogen wird. Die bei der Verbrennung frei werdende Wärme wird an den Heizkreis abgegeben.



- 1 Rückbranschutzeinrichtung
- 2 Integrierte Steuerung
- 3 Automatische Zündung mittels Heißluftgebläse
- 4 Stufenrost mit Kipprost
- 5 Geteilte 2-Zonen Brennkammer
- 6 Stehender Röhrenwärmetauscher mit integrierten Turbulatoren
- 7 Automatische Abgas- und Verbrennungsüberwachung durch Lambdasondensteuerung
- 8 Drehzahlgeregeltes Saugzuggebläse
- 9 Ascheaustragung für Verbrennung- und Flugasche
- 10 Frontseitige Aschenbehälter
- 11 Sicherheitstemperaturbegrenzer

Abbildung 6-14: Darstellung des Versuchskessels (Herz (Hrsg.), 2010)

Schon die ersten Vorversuche mit 100% Schilfpellets haben ein Problem mit dem Ascheabtransport aufgezeigt. Der hohe Aschegehalt (siehe Tabelle 6-18) des Schilfs führt zu einer Überladung der Brennkammer. Trotz des hohen Ascheschmelzpunktes (siehe Tabelle 3-3) weist die Schilfasche ein hohes Bindungsverhalten auf. Nach dem Abbrand bilden die einzelnen Aschepartikel einen porösen Körper (siehe Abbildung 6-15). Im Gegensatz zu Schlackenbildung, die von halmartigen Brennstoffen bekannt ist, kann die Schilfasche mit relativ geringem mechanischem Aufwand zerkleinert werden.



Abbildung 6-15: Ascherückstand aus dem ersten Verbrennungsversuch mit 100% Schilffanteil

Basierend auf dieser Erkenntnis wurde das Ascheaustragungssystem des Kessels adaptiert. Das vorrangige Ziel der Umbauten war, die Asche der Schilfpellets aus der Brennkammer abzutransportieren (zu zerkleinern) ohne das Rost- und Verbrennungsverhalten wesentlich zu beeinflussen. Weiters sollten die Adaptierung möglichst einfach zu realisieren sein. Zielführend erwies sich das Anbringen von Brecherwerkzeugen, die mit dem Aschetransport mitbewegt werden und ein auflockern der Asche beim Abtransport ermöglichen. Die Umbauarbeiten, die in mehreren Schritten durchgeführt bzw. erprobt wurden, sind in Abbildung 6-16 dargestellt.

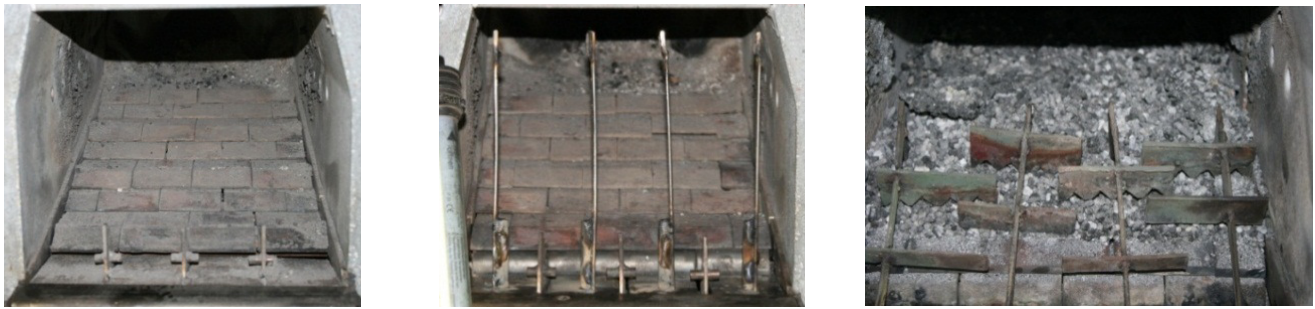


Abbildung 6-16: Modifikation Treppenrost/Ascheaustragung

6.4.1.3 Versuchsplanung

Ziel der Versuche ist die Verwertung von Schilf in Form von Pellets als alleiniger Brennstoff, bzw. in Form von Mischungen mit Holzpellets, zu untersuchen. Als Referenzversuche dienen dabei Versuche mit 100% Holzpellets sowie mit Holzhackgut mit Rindenanteil. Die Tabelle 6-17 zeigt die Brennstoffzusammensetzungen der einzelnen Versuche. Diverse Vorversuche dienten zur Bestimmung der idealen Parametereinstellung des Kessels. Die Eigenschaften des jeweiligen Brennstoffs werden in Tabelle 3-3 bzw. Tabelle 6-18 näher erläutert.

Tabelle 6-17: Versuchsbrennstoffe

Brennstoffzusammensetzung	Art	Holzanteil [Gew.%]	Schilfanteil [Gew.%]
Hackschnitzel Holz + Rinde	Hackschnitzel	100	0
Pellets Holz/Schilf 100/0	Pellets	100	0
Pellets Holz/Schilf 75/25	Pellets	75	25
Pellets Holz/Schilf 50/50	Pellets	50	50
Pellets Holz/Schilf 25/75	Pellets	25	75
Pellets Holz/Schilf 0/100	Pellets	0	100

6.4.1.4 Brennstoffcharakteristik

In der Abbildung 6-17 sind Fotos zu den jeweiligen Brennstoffen bzw. Mischungen dargestellt.



Schilfpellets



Holzpellets



Holzhackgut

Abbildung 6-17: Versuchsbrennstoffe

In der Tabelle 6-18 werden die wichtigsten Eigenschaften des jeweiligen Brennstoffes angeführt. Es ist zu erkennen, dass vor allem in Bezug auf den Aschegehalt ein wesentlicher Unterschied zwischen Schilfpellets und den Holzbrennstoffen lag.

Tabelle 6-18: Eigenschaften der Versuchsbrennstoffe

Brennstoff	Heizwert ^{*)} [MJ/kg]	Wassergehalt ^{*)} [%]	Aschegehalt ^{**)} [%]
Schilfpellets	15,8	6,1	6,7
Holzpellets	17,0	7,0	0,8
Holzhackgut	14,0	20,7	0,6

^{*)} auf Feuchtmasse bezogen
^{**)} auf Trockenmasse bezogen

6.4.2 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Versuchsauswertung beinhaltet die Analyse der Ergebnisse aus den Versuchen mit den unterschiedlichen Brennstoffen hinsichtlich

- Wärmeleistung
- Kesselwirkungsgrad (direkte Methode)
- Abgasbestandteile (O₂, CO₂, CO, NO_x, SO₂, Staub).

Da die Messungen wesentlich vom Intervall der Rostreinigung (Ascheaustragung aus der Brennkammer) beeinflusst werden, werden in bestimmten Auswertungsfällen die Emissionen sowohl inklusive Rostreinigung als auch exklusive (korrigiert) Rostreinigung dargestellt.

6.4.2.1 Wärmeleistung und Kesselwirkungsgrad

Die Wärmeleistung ist die pro Zeiteinheit nutzbar abgegebene Wärme(menge) an den Wasserkreis. (ÖNORM EN 303-5, 1999) Die abgegebene Wärmeleistung wurde durch Messungen unmittelbar am Kessel bestimmt. In der Abbildung 6-18 sind die jeweilig gemessenen Wärmeleistungen der Versuche dargestellt.

Die höchste Wärmeleistung (94 kW) wurde bei der Verwertung von Holzpellets erzielt. Je nach Massenanteil der Schilfpellets nimmt die Wärmeleistung annähernd linear bis zu 40 kW bei 100 % Schilfpellets ab, wobei das Kriterium für die Kesseleinstellung ein stationärer Kesselbetrieb, ohne Überfrachtung des Verbrennungsraumes durch Verbrennungsrückstände, ist. Beim Einsatz von Hackschnitzel mit Rinde konnte eine Wärmeleistung von 77 kW erreicht werden, welche dem Versuch (75 kW) mit 75 % Holz- und 25 % Schilfpellets entspricht.

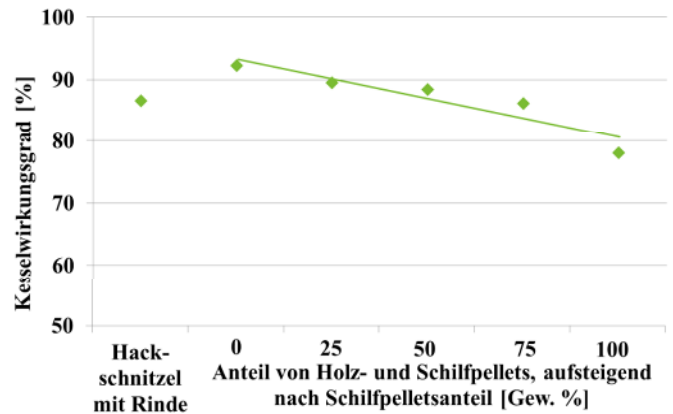
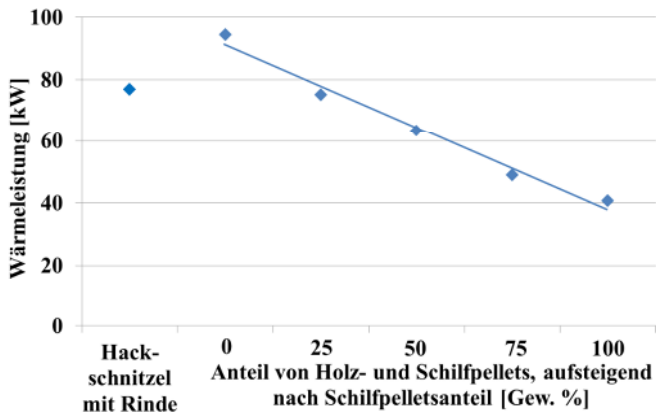


Abbildung 6-18: Abgeführte Wärmeleistung

Abbildung 6-19: Kesselwirkungsgrad

Der Kesselwirkungsgrad wird über die direkte Methode bestimmt. Bei der direkten Methode wird der Nutzen (abgeführte Wärmeleistung) dem Aufwand (eingesetzte Brennstoffwärmemenge) gegenübergestellt. (ÖNORM EN 303-5, 1999) Der höchste Wirkungsgrad wurde mit 92 % beim Versuch mit reinen Holzpellets erzielt (siehe Abbildung 6-19). In Abhängigkeit vom Massenanteil der Schilfpellets nimmt dieser Wert ab. Bis zu einem Schilfpellets-Massenanteil von 75 % wurden noch durchaus vertretbare Werte für den Kesselwirkungsgrad erreicht (vergleichbar mit dem Referenzversuch Holz hackschnitzel). Der Versuch mit 100 % Schilfpellets zeigte hingegen mit 78 % ein unzureichendes Ergebnis. Der Referenzversuch mit Hackschnitzel mit Rinde war mit einem Wirkungsgrad von 87 % im Bereich der Versuche mit 50/50 (88 %) und 25/75 (86 %) Holz/Schilfpellets-Mischungen.

6.4.2.2 Emissionen

Sauerstoff im Abgas stellt generell keine Emission dar, allerdings führt ein erhöhter Restsauerstoffgehalt im Abgas zu erhöhten Abgasverlusten, was schlussendlich eine Wirkungsgradminderung zur Folge hat. Der Sauerstoffanteil im Abgas dient ebenso als Regelgröße für die Verbrennungsregelung. Abbildung 6-20 zeigt den gemessenen O₂-Wert bei allen Versuchen im Mittel über 10% liegt.

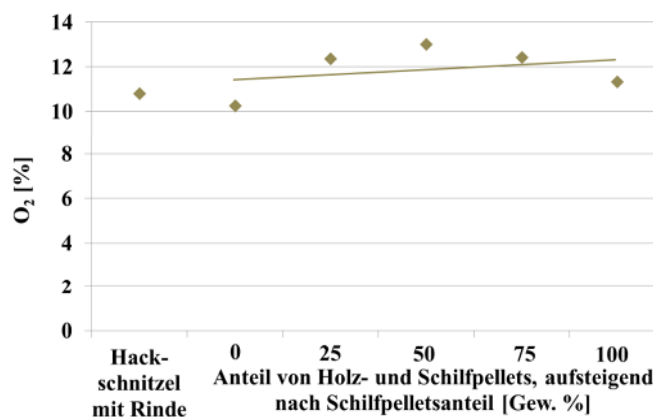


Abbildung 6-20: Sauerstoffgehalt im Abgas

Kohlenstoffmonoxid ist ein Indikator für die Qualität der Verbrennung. Ziel ist es, die CO-Emissionen möglichst niedrig zu halten und folglich eine vollständige Oxidation zu gewährleisten.

Im Fall der getätigten Verbrennungsversuche konnte festgestellt werden, dass die Rostreinigung einen wesentlichen Einfluss auf die CO-Emissionen hat. Während der Rostreinigung kommt es zu einer Unterversorgung mit Sauerstoff, wodurch die CO-Werte erheblich ansteigen. Aus diesem Grund werden nachfolgend zwei Diagramme abgebildet, wobei einmal die Werte inklusive Rostreinigung (Abbildung 6-21) und einmal ohne Rostreinigung (Abbildung 6-22) angeführt werden. Beim Vergleich mit den Grenzwerten für CO aus der Feuerungsanlagenverordnung (FAV, 2011) kann festgestellt werden, dass bei allen Versuchen der Grenzwert von 800 mg/m³ (bei Referenz- Sauerstoffgehalt 11%) eingehalten wurde. Die Abbildung 6-22 zeigt das Ergebnis der CO Messung, bei welcher die Reinigungsphasen herauskorrigiert wurden. Daraus ergibt sich ein wesentlich geringerer Mittelwert der CO Messungen.

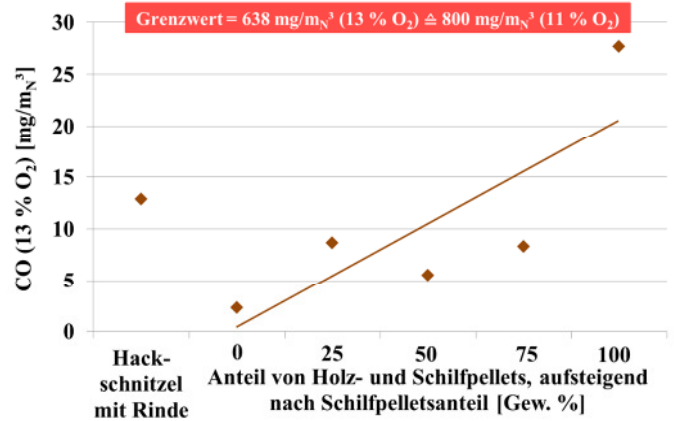
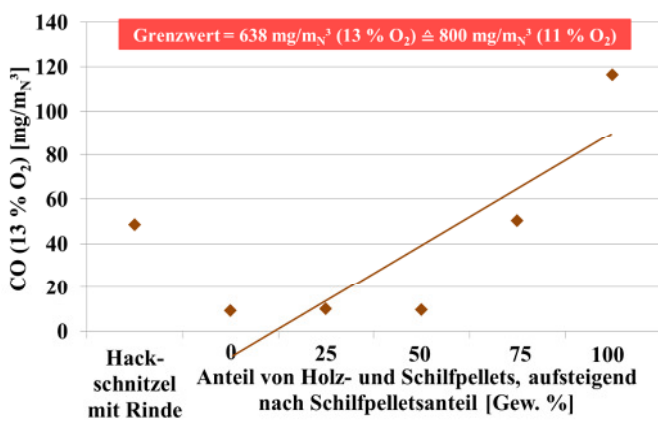


Abbildung 6-21: Kohlenstoffmonoxidgehalt im Abgas inkl. Rostreinigung

Abbildung 6-22: Kohlenstoffmonoxidgehalt im Abgas ohne Rostreinigung

Die Messwerte für NO_x (NO, NO₂) (siehe Abbildung 6-23) beinhalten auch Werte während der Rostreinigung, da diese die NO_x-Emissionen nur sehr gering beeinflusst. Der Grenzwert (250 mg/m³ bei Referenz- Sauerstoffgehalt 11%) lt. FAV (2011) für Holz als Pressling oder Hackgut (siehe Abbildung 6-23) wurde im Fall von Hackgut und 100% Holzpellets unterschritten. Die NO_x Emissionen steigen mit dem Massenanteil an Schilfpellets linear an, wobei bei einer Brennstoffzusammensetzung mit 100 % Schilfpellets der höchste Wert ermittelt wurde. Bezüglich des Grenzwertes für Stroh oder ähnliche pflanzliche Stoffe, welcher im Fall für Schilf herangezogen wird, wurden die vorgegebenen 400 mg/m³ (Referenz- Sauerstoffgehalt 13%) lt. FAV (2011) bei allen Versuchen mit Schilfanteil unterschritten.

Die SO₂-Emissionen sind der Abbildung 6-24 zu entnehmen. Die höchsten Emissionen mit rund 100 mg/m³ wurden bei den Versuchen mit 100% und 75% Schilfanteil gemessen. Die geringsten SO₂-Emissionen wurden bei jenen Versuchen mit 100% Holzpellets- Anteil erzielt. Es ist ein lineares Ansteigen der SO₂- Emissionen mit steigendem Schilfanteil zu erkennen.

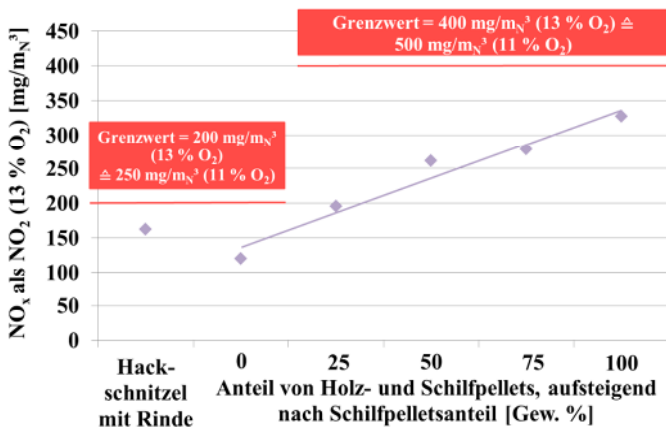


Abbildung 6-23: Stickoxide im Abgas

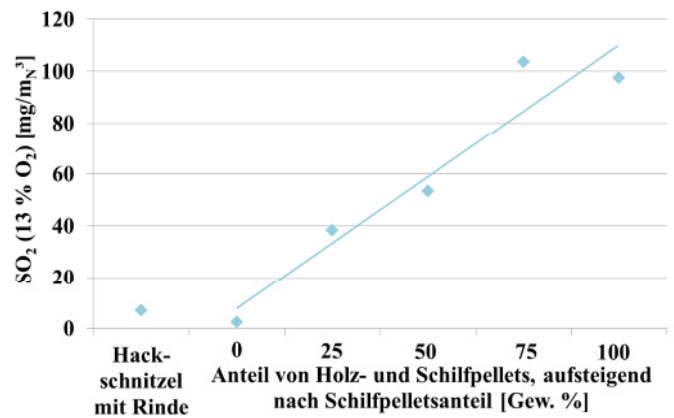


Abbildung 6-24: Schwefeldioxidgehalt im Abgas

Die Erfassung der Staubemissionen (siehe Abbildung 6-25) erfolgte mittels eines Kaskadenimpaktors. Bei der Analyse der Staubemissionen konnte festgestellt werden, dass die Grenzwerte (150 mg/m_N³ bei Referenz- Sauerstoffgehalt 11%) lt. Feuerungsanlagen-Verordnung (FAV, 2011) bei allen Versuchen eingehalten wurden. Am wenigsten Staubpartikel wurden beim Versuch mit 100 % Holzpellets (ca. 15 mg/m_N³) ermittelt. Ähnlich wie bei den NO_x- und SO₂- Messwerten konnte auch in Abhängigkeit des Schilfanteils ein linearer Anstieg der Staubemissionen bis 31 mg/m_N³ bei 100 % Schilfpellets festgestellt werden. Der Versuch mit Hackgut mit Rindenanteil zeigte mit durchschnittlich 28 mg/m_N³ das gleiche Ergebnis wie der Versuch mit 25 % Holz- und 75 % Schilfanteil.

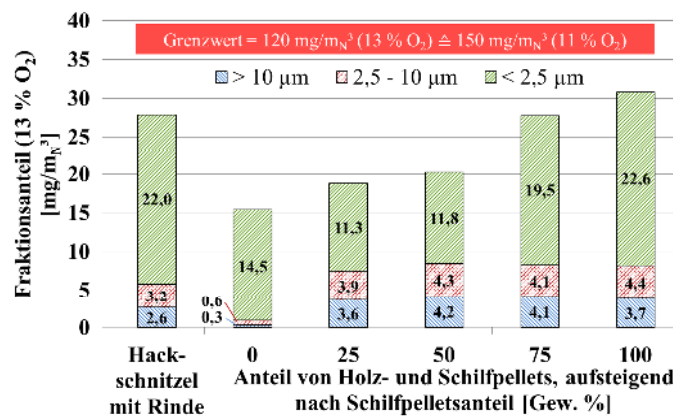


Abbildung 6-25: Anteil Staubfraktionen im Abgas

6.4.3 Ökologische Bewertung

Die ökologische Bewertung der thermischen Verwertung von Schilfpellets in der Kleinanlage wird mit Holzpellets verglichen. Es werden die Wirkkategorien Treibhauspotential (100 Jahre), Humantoxizität, Versauerungspotential und Ozonabbaupotential für beide berechnet. Außerdem erfolgt eine Abschätzung der Feinstaubbildung für beide Verfahren. Die Berechnung inkludiert die Bereitstellungskette der Inputstoffe, deren Transport zur Anlage und die thermische Verwertung im

Kleinkessel. Für den gesamten Verwertungsweg sind die Umweltbelastungen aus der zur Verfügung Stellung der Infrastruktur anteilig inkludiert.

Die Ergebnisse sind in den Tabelle 6-11 bis Tabelle 6-15 für die einzelnen Abschnitte des Verwertungsweges getrennt dargestellt. Die Ergebnisse sind auf 1MJ abgegebene Wärme bezogen. Die Ergebnisse zeigen, dass es tendenziell in den betrachteten Wirkkategorien mehr Vorteile bringt fossile Energieträger zu substituieren als Holzpellets. Generell ist zu beobachten, dass die Verwertung von Schilf im Vergleich zu Holzpellets eine Verschlechterung in allen betrachteten Wirkkategorien aufweist. Der Umstand, dass der Prozess für die Holzpelletsherstellung Sägereststoffe aus der Holzindustrie verwendet und somit die Holzbringung nicht berücksichtigt wird, ist ausschlaggebend für die Erhöhung der Belastungen im Vergleich zur Bereitstellung von Schilfpellets. Die zusätzlichen Emissionen in den Wirkkategorien Humantoxizität, Feinstaubbildung und Versauerung sowohl bei der Substitution von Holz, Heizöl EL als auch Erdgas sind ein Resultat von hohen Feinstaub- und Stickstoffmonoxid- Emissionen bei der Verbrennung von Schilf.

Tabelle 6-19: Ergebnisse ökologische Bewertung thermische Verwertung Holz- und Schilfpellets in der Kleinanlage sowie Nutzwärmebereitstellung durch Heizöl EL und Erdgas im Heizkessel; Wirkkategorie Treibhauspotential (100 Jahre); Bezug 1 [MJ] erzeugte Wärme

	Einheit	Veränderung Substitution Holz zu Schilf ¹⁾	Veränderung Substitution Heizöl EL zu Schilf ¹⁾	Veränderung Substitution Erdgas zu Schilf ¹⁾
Brennstoff Bereitstellung	[kg CO ₂ -Äqv.]	2,24E-03		
Pelletieren	[kg CO ₂ -Äqv.]	1,66E-03		
Transport zur Kleinanlage	[kg CO ₂ -Äqv.]	1,31E-04		
Thermische Nutzung ²⁾	[kg CO ₂ -Äqv.]	8,04E-04		
Gesamt	[kg CO ₂ -Äqv.]	4,84E-03	-7,80E-02	-5,59E-02

¹⁾ Positive Werte bedeuten zusätzliche Emissionen, negative Werte bedeuten Emissionsminderungen
²⁾ Emissionen aus Verbrennung, Belastungen aus Herstellung der Infrastruktur (Vorketten) inkludiert; CO₂ aus biog. Kohlenstoff im GWP 100 mit Null verrechnet

Tabelle 6-20: Ergebnisse ökologische Bewertung thermische Verwertung Holz- und Schilfpellets in der Kleinanlage sowie Nutzwärmebereitstellung durch Heizöl EL und Erdgas im Heizkessel; Wirkkategorie Humantoxizitätspotential; Bezug 1 [MJ] erzeugte Wärme

	Einheit	Veränderung Substitution Holz zu Schilf ¹⁾	Veränderung Substitution Heizöl EL zu Schilf ¹⁾	Veränderung Substitution Erdgas zu Schilf ¹⁾
Brennstoff Bereitstellung	[kg DCB-Äqv.]	1,18E-04		
Pelletieren	[kg DCB-Äqv.]	4,90E-04		
Transport zur Kleinanlage	[kg DCB-Äqv.]	2,15E-05		
Thermische Nutzung ²⁾	[kg DCB-Äqv.]	8,78E-03		
Gesamt	[kg DCB-Äqv.]	9,41E-03	7,68E-03	1,05E-02

¹⁾ Positive Werte bedeuten zusätzliche Emissionen, negative Werte bedeuten Emissionsminderungen
²⁾ Emissionen aus Verbrennung, Belastungen aus Herstellung der Infrastruktur (Vorketten) inkludiert

Tabelle 6-21: Ergebnisse ökologische Bewertung thermische Verwertung Holz- und Schilfpellets in der Kleinanlage sowie Nutzwärmebereitstellung durch Heizöl EL und Erdgas im Heizkessel; Wirkkategorie Versauerungspotential; Bezug 1 [MJ] erzeugte Wärme

	Einheit	Veränderung Substitution Holz zu Schilf ¹⁾	Veränderung Substitution Heizöl EL zu Schilf ¹⁾	Veränderung Substitution Erdgas zu Schilf ¹⁾
Brennstoff Bereitstellung	[kg SO ₂ -Äqv.]	2,26E-05		
Pelletieren	[kg SO ₂ -Äqv.]	3,03E-06		
Transport zur Kleinanlage	[kg SO ₂ -Äqv.]	7,10E-07		
Thermische Nutzung ²⁾	[kg SO ₂ -Äqv.]	3,71E-04		
Gesamt	[kg SO ₂ -Äqv.]	3,97E-04	2,69E-04	4,11E-04

¹⁾ Positive Werte bedeuten zusätzliche Emissionen, negative Werte bedeuten Emissionsminderungen
²⁾ Emissionen aus Verbrennung, Belastungen aus Herstellung der Infrastruktur (Vorketten) inkludiert

Tabelle 6-22: Ergebnisse ökologische Bewertung thermische Verwertung Holz- und Schilfpellets in der Kleinanlage sowie Nutzwärmebereitstellung durch Heizöl EL und Erdgas im Heizkessel; Wirkkategorie Ozonabbaupotential (katalytisches); Bezug 1 [MJ] erzeugte Wärme

	Einheit	Veränderung Substitution Holz zu Schilf ¹⁾	Veränderung Substitution Heizöl EL zu Schilf ¹⁾	Veränderung Substitution Erdgas zu Schilf ¹⁾
Brennstoff Bereitstellung	[kg R11-Äqv.]	3,50E-10		
Pelletieren	[kg R11-Äqv.]	1,62E-10		
Transport zur Kleinanlage	[kg R11-Äqv.]	2,10E-11		
Thermische Nutzung ²⁾	[kg R11-Äqv.]	6,56E-11		
Gesamt	[kg R11-Äqv.]	5,99E-10	-1,20E-08	-9,37E-09

¹⁾ Positive Werte bedeuten zusätzliche Emissionen, negative Werte bedeuten Emissionsminderungen
²⁾ Emissionen aus Verbrennung, Belastungen aus Herstellung der Infrastruktur (Vorketten) inkludiert

Tabelle 6-23: Ergebnisse ökologische Bewertung thermische Verwertung Holz- und Schilfpellets in der Kleinanlage sowie Nutzwärmebereitstellung durch Heizöl EL und Erdgas im Heizkessel; Feinstaubbildung; Bezug 1 [MJ] erzeugte Wärme

	Einheit	Veränderung Substitution Holz zu Schilf ¹⁾	Veränderung Substitution Heizöl EL zu Schilf ¹⁾	Veränderung Substitution Erdgas zu Schilf ¹⁾
Brennstoff Bereitstellung	[kg PM10-Äqv.]	1,23E-05		
Pelletieren	[kg PM10-Äqv.]	1,07E-06		
Transport zur Kleinanlage	[kg PM10-Äqv.]	3,31E-07		
Thermische Nutzung ²⁾	[kg PM10-Äqv.]	4,27E-05		
Gesamt	[kg PM10-Äqv.]	5,64E-05	1,66E-05	5,16E-05

¹⁾ Positive Werte bedeuten zusätzliche Emissionen, negative Werte bedeuten Emissionsminderungen
²⁾ Emissionen aus Verbrennung, Belastungen aus Herstellung der Infrastruktur (Vorketten) inkludiert

7 UMSETZUNGSKONZEPT

7.1 Umsetzungspfade und Szenarien

7.1.1 Stoffliche und thermische Verwertung Zementindustrie

Die Verwertung von Schilf in der Zementindustrie erfolgt in Form von Häckselgut. Die gewählte Bereitstellungskette für das Inputmaterial ist jene, die aus ökologischer und ökonomischer Sicht mit den geringsten Auswirkungen verbunden ist. Im Falle der Häckselgutbereitstellung die Bereitstellungskette C-H (vgl. Abbildung 7-1 und Kapitel 7.2 bzw. 7.3).

Als alternativer Brennstoff wurde Petrolkoks betrachtet. Die Bereitstellung dieses Brennstoffes inkludiert die Herstellung von Petrolkoks und den Transport zur thermischen Verwertung im Zementwerk.

7.1.2 Thermische Verwertung – Wirbelschichtvergasung

Die Verwertung von Schilf in der Großanlage (Vergasung) erfolgt in Form von Häckselgut. Die gewählte Bereitstellungskette für das Inputmaterial ist jene, die aus ökologischer und ökonomischer Sicht mit den geringsten Auswirkungen verbunden ist. Im Falle der Häckselgutbereitstellung die Bereitstellungskette C-H (vgl. Abbildung 7-1 und Kapitel 7.2 bzw. 7.3). Dieser Bereitstellungspfad wird mit um die Produktgasherstellung, die Nutzung im Motor und eine Stromgutschrift für die erzeugte elektrische Energie erweitert.

Als alternatives Inputmaterial wurde Holzhackgut ab Wald betrachtet. Die Bereitstellung dieses Inputmaterial umfasst die Holzhackgutherstellung, den Transport, die Lagerung vor Ort, die Produktgasherstellung, die Nutzung im Motor und eine Stromgutschrift für die erzeugte elektrische Energie. Außerdem wurde als fossile Alternative Strom und Wärmebereitstellung mittels Erdgas-BHKW betrachtet, was zeigt, dass die Substitution eines fossilen Energieträgers ökologisch mehr Vorteile bringt.

7.1.3 Thermische Verwertung – Verbrennung Großanlage

Die Abbildung 7-1 gibt einen Überblick der betrachteten Szenarien für die Verwertung von Schilfhäckselgut in einem Fernheizwerk (Großkesselanlage). Die Bereitstellungsketten (A-H bis D-H) variieren in der aufgrund unterschiedlicher Technologien für die Ernte und Arten der Lagerung. Eine weitere Variante ist, zu welchem Zeitpunkt in der Bereitstellungskette der Transport erfolgt. Für die Szenarien A-H und B-H wird der LKW-Transport vor dem Häckseln realisiert. Für die Szenarien C-H und D-H erfolgt der Transport nach dem Häckseln. Außerdem werden zu Anfang der Bereitstellungskette, nach der Ernte, einmal Bündel, das andere Mal Rundballen transportiert. Bei den Szenarien A-H und B-H wurde eine zusätzliche Lagerung in einer landwirtschaftlichen Scheune untersucht. Diese Lagerung wurde in den Szenarien C-H und C-H nicht mit einberechnet, um den Einfluss einer zusätzlichen Lagerung aufzuzeigen.

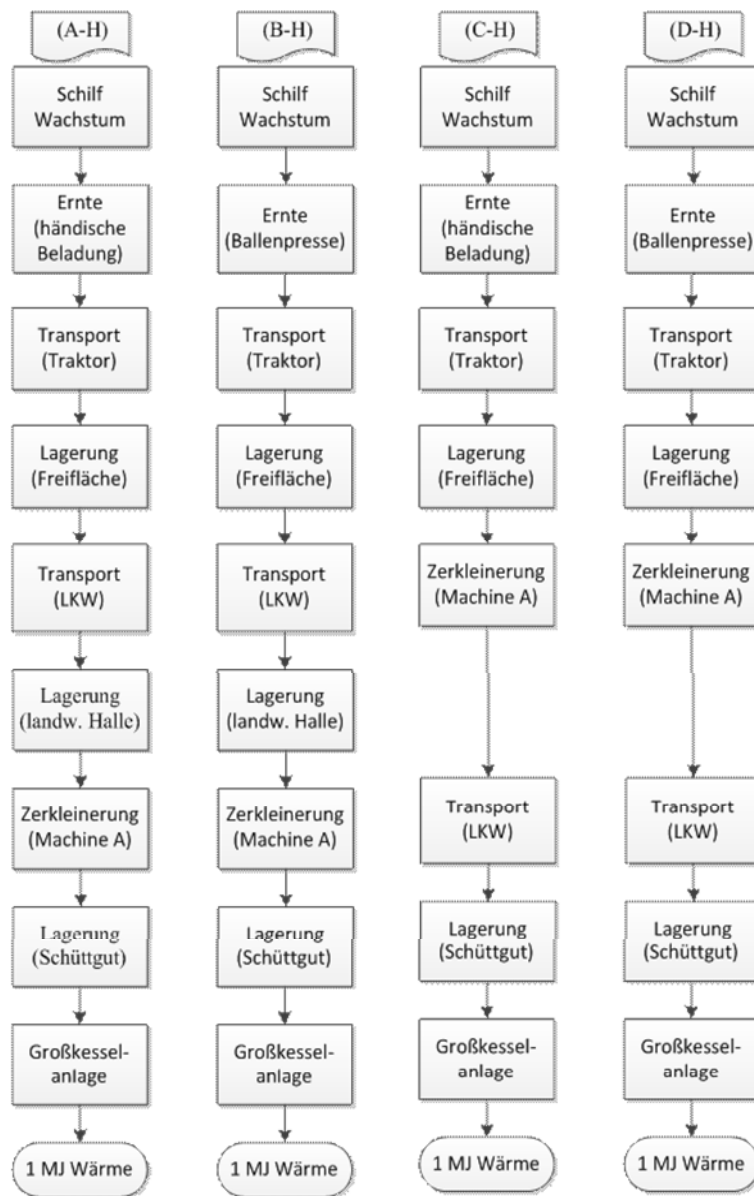


Abbildung 7-1: Untersuchte Bereitstellungsketten für die Bereitstellung von 1 MJ Wärme aus Schilfhäckselgut

Als Referenz zu den beschriebenen Schilf-Szenarien werden Szenarios mit 100% Holz und fossilen Brennstoffen (Erdgas und Heizöl) ausgewertet. Die Referenzszenarien beginnen mit der Bereitstellung vom jeweiligen Brennstoff (Holzhäckselgut, Erdgas oder Heizöl), gefolgt vom Transport zum Endkunden (LKW im Falle von Holzhackselgut) und enden mit der Verbrennung im Fernheizwerk.

7.1.4 Thermische Verwertung – Verbrennung Kleinanlage

Vier Bereitstellungsketten für die thermische Verwertung von Schilfpellets in einer Kleinkesselanlage, Abbildung 7-2, wurden als separate Szenarien modelliert. Die Bereitstellungsketten A-P und D-P variieren aufgrund unterschiedlicher Technologien für die Ernte und Zerkleinerung. Eine weitere Variante ist, zu welchem Zeitpunkt in der Bereitstellungskette der Transport erfolgt. Für die Szenarios A-P und B-P wird der Transport mit dem LKW nach dem Häckseln realisiert, für die Szenarios C-P und D-P vor dem

Häckseln. Außerdem werden, aufgrund der Erntetechnologie, einmal Bündeln und das andere Mal Rundballen transportiert.

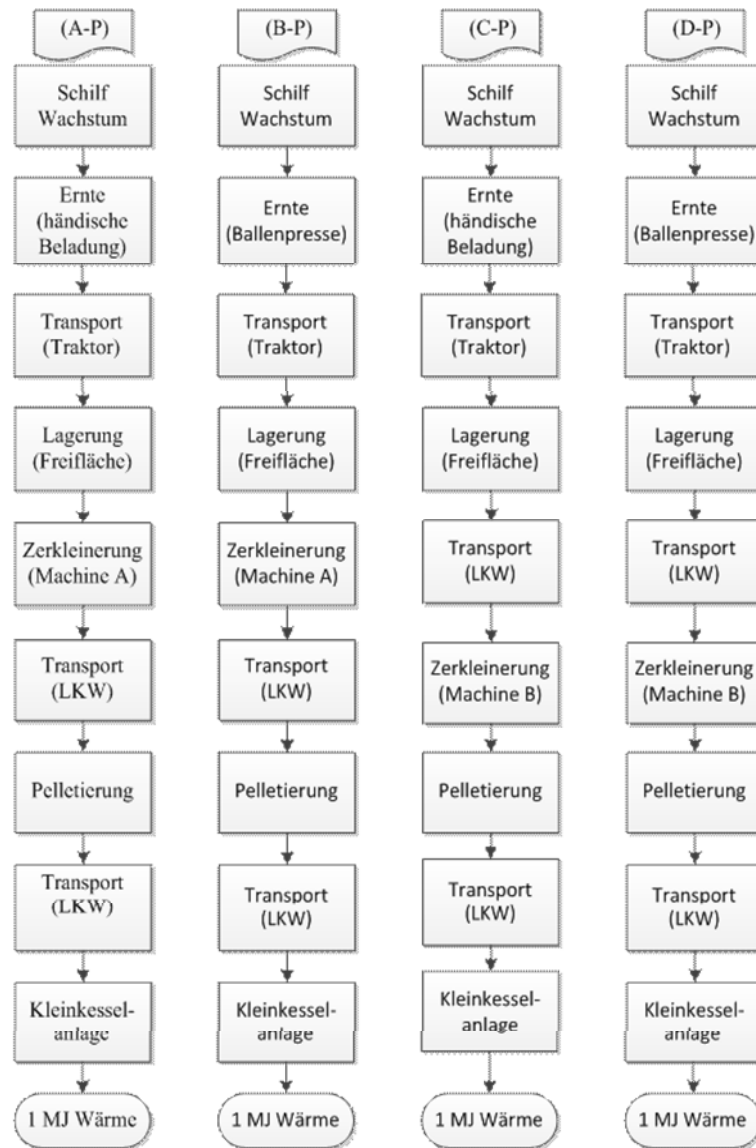


Abbildung 7-2: Untersuchte Bereitstellungsketten für die Bereitstellung von 1 MJ Wärme aus Schilfpellets

Als Referenz zu den beschriebenen Schilf-Szenarien werden Szenarios mit 100% Holz und fossilen Brennstoffen (Erdgas und Heizöl) ausgewertet. Die Referenzszenarien beginnen mit der Bereitstellung vom jeweiligen Brennstoff (Holzpellets, Erdgas oder Heizöl), gefolgt vom Transport zum Endkunden (LKW im Falle von Holzpellets) und enden mit der Verbrennung im Heizkessel.

7.2 Ökonomische Bewertung

7.2.1 Ökonomische Bewertung Bereitstellungswege

Die Bereitstellungsketten für die Herstellung von Häckselgut (Abbildung 7-1) und Pellets (Abbildung 7-2) werden ökonomisch bewertet und verglichen. Die zugrundeliegende Methodik ist im Kapitel 4.1 beschrieben, die Inputdaten sind in Tabelle 11-1 dargestellt.

Für die Schilfernte wurde der Schilfgürtel in 3 Zonen unterteilt (siehe Abbildung 5-11). Wird Schilf im Randbereich geerntet, kann ein zusätzlicher Transport aus dem Schilfgürtel entfallen. Die Ergebnisse für die Erzeugung von Schilfhäckselgut und Schilfpellets aus Schilf vom Randbereich (Zone 1) sind in der Tabelle 7-1 und Tabelle 7-2 als „Summe Zone 1“ aufgelistet. Für die Schilfernte innerhalb des Schilfgürtels (Zone 2 und 3) wird ein zusätzliches Transportmittel benötigt. Dafür werden Kosten von 35,65 €/t_{FM} angesetzt, die Herstellkosten für Schilfpellets aus diesem Bereich stellt die „Summe Zone 2 und 3“ dar. Die Bereitstellungskette C-H ist mit den geringsten Kosten für die Herstellung von 1 t_{FM} Schilfhäckselgut verbunden. Der Verwertungsweg A-P weist die geringsten Kosten für die Bereitstellung von 1 t_{FM} Schilfpellets auf.

Tabelle 7-1: Ergebnisse ökonomische Bewertung 4 unterschiedliche Verwertungswege Schilfhäckselgut; Bezug 1 [t_{FM}] Schilfhäckselgut

	Einheit	A-H	B-H	C-H	D-H
Ernte (Bünde/Ballen)	[€/t _{FM}]	60,81	91,89	60,81	91,89
Transport (Traktor)	[€/t _{FM}]	11,70	11,85	11,70	11,85
Lager (Freifläche)	[€/t _{FM}]	0,35	0,35	0,35	0,35
Transport (LKW)	[€/t _{FM}]	24,17	27,62	-	-
Lager (landw. Halle)	[€/t _{FM}]	6,83	9,18	-	-
Zerkleinern	[€/t _{FM}]	11,57	11,57	11,57	11,57
Transport (LKW)	[€/t _{FM}]	-	-	11,60	11,60
Summe Zone 1	[€/t _{FM}]	115	152	96	127
Transport (Transportmittel im Schilfgürtel)	[€/t _{FM}]	35,65	35,65	35,65	35,65
Summe Zone 2 und 3	[€/t _{FM}]	151	188	132	163

Um die Verwertungswege effizienter zu gestalten wird angedacht eine neue Erntemaschine zu konzipieren. Im Zuge dieser Überlegung wurden maximale Erntekosten für Schilf berechnet. Die Ermittlung dieser maximalen Kosten basiert auf Referenzpreisen für Waldhackgut und Holzpellets. Da Holz und Schilf verschiedene Heizwerte aufweist, wurden diese Preise im ersten Schritt um den entsprechenden Faktor bereinigt. Die nun vergleichbaren Referenzpreise wurden als Obergrenze festgelegt. Nach Abzug aller Transport-, Lager- und Verarbeitungskosten ergeben sich dann die maximale Erntekosten für das jeweilige Endprodukt (Tabelle 7-3). Aus der Tabelle ist ersichtlich dass die Erntekosten für die Bereitstellung von Schilfhäckselgut maximal 49 €/t_{FM} betragen können um dasselbe Preisniveau wie bei Holzhackgut zu erreichen. Werden Schilfpellets produziert, könnten die maximal

möglichen Erntekosten auch 112 €/t_{FM} betragen. Unter der Voraussetzung, dass die Preise für die Transporte, die Lagerung und die Verarbeitung nicht von den angegebenen Preisen abweichen.

Tabelle 7-2: Ergebnisse ökonomische Bewertung 4 unterschiedliche Verwertungswege Schilfpellets; Bezug 1 [t_{FM}] Schilfpellets

	Einheit	A-P	B-P	C-P	D-P
Ernte (Bündel/Ballen)	[€/t _{FM}]	60,81	91,89	60,81	91,89
Transport (Traktor)	[€/t _{FM}]	11,70	11,85	11,70	11,85
Lager (Freifläche)	[€/t _{FM}]	0,35	0,35	0,35	0,35
Transport (LKW)	[€/t _{FM}]	-	-	24,17	27,62
Zerkleinern	[€/t _{FM}]	11,57	11,57	19,01	19,01
Transport (LKW Häckselgut)	[€/t _{FM}]	11,60	11,60	-	-
Pelletieren	[€/t _{FM}]	38,27	38,27	38,27	38,27
Transport (LKW Pellets)	[€/t _{FM}]	4,64	4,64	4,64	4,64
Summe Zone 1	[€/t _{FM}]	139	170	159	194
Transport (Transportmittel im Schilfgürtel)	[€/t _{FM}]	35,65	35,65	35,65	35,65
Summe Zone 2 und 3	[€/t _{FM}]	175	206	195	229

Tabelle 7-3: Maximale Erntekosten Schilf bei definierter Preisgrenze der Endprodukte

	Einheit	Häckselgut	Pellets
Preisobergrenze (Heizwert- bereinigt)	[€/t _{FM}]	84 ¹⁾	190 ²⁾
Transport (Traktor)	[€/t _{FM}]	11,70	11,70
Lager (Freifläche I)	[€/t _{FM}]	0,35	0,35
Zerkleinern	[€/t _{FM}]	11,57	11,57
Transport (LKW)	[€/t _{FM}]	11,60	11,60
Pelletieren	[€/t _{FM}]	-	38,27
Transport (LKW Pellets)	[€/t _{FM}]	-	4,64
Maximale Erntekosten Schilf	[€/t _{FM}]	49	112

¹⁾ Quelle Preise für Waldhackgut im Burgenland: (Landwirtschaftskammer, 2012)
²⁾ Quelle durchschnittliche Pelletspreise 2003 bis 2013 (Pro Pellets Austira, 2013)

Werden die Preise für die Bereitstellung von Schilf- Häckselgut (Tabelle 7-1) mit der Heizwert- bereinigten Preisobergrenze aus Tabelle 7-3 verglichen, zeigt sich, dass die Preise für Schilf- Häckselgut zwischen 14% und 26% über dem Heizwert- bereinigten Preis von Waldhackgut liegt. Bei der Bereitstellung von Schilfpellets (Tabelle 7-2) liegen die Kosten für die Bereitstellung zwischen 8% und 27% unter der Heizwert- bereinigten Preisobergrenze aus Tabelle 7-3.

7.2.2 Ökonomische Bewertung Zementindustrie

Die ökonomische Bewertung erfolgt mittels der Grenzvermeidungskosten. Für die Berechnung der Grenzvermeidungskosten für $CO_{2,fossil}$ im gegenständlichen Fall wurden verschiedene Brennstoffmix-Szenarien im Calcinator – im Fall des Einsatzes von Schilf auf Basis der Ergebnisse des Langzeitversuchs – bei unverändertem Brennstoffmix am Hauptbrenner des Drehrohrofens herangezogen. Die über die Calcinator-Feuerung eingebrachte Energiemenge wurde dabei - den Prozessanforderungen entsprechend - jeweils konstant belassen.

Insgesamt wurden die Grenzvermeidungskosten für fünf unterschiedliche Brennstoffversorgungs-szenarios am Calcinator betrachtet (vgl. Abbildung 7-3): das Standardszenario (vgl. Abbildung 7-4, entspricht dem derzeit real eingesetzten Brennstoffmix), das Referenzszenario (vollständige Deckung des Energiebedarfs am Calcinator durch PetCoke) und die alternativen Brennstoffversorgungs-szenarios A - C mit Schilf (vgl. Abbildung 6-1), Ersatzbrennstoff mit erhöhtem biogenen Anteil (Pieber et al., 2012) bzw. der energetischen Verwertung von Klärschlamm (Rößinger, 2008). Auf Basis durchgeführter Versuche sowie Betriebserfahrungen kann der Brennstoffmix entsprechend Szenario A und B aufgrund des hohen anlagentechnischen Standards des Zementwerks Mannersdorf ohne weitere bauliche Änderungen (d. h. ohne zusätzliche Investitions- und Betriebskosten) eingesetzt werden. Im Szenario C wurden in einer Literatur-basierten vergleichenden Betrachtung Investitions- und Betriebskosten für eine Klärschlamm-trocknungsanlage in den Betrachtungen berücksichtigt.

Die genaue Zusammensetzung der Brennstoffmixe ist Abbildung 7-3 zu entnehmen.

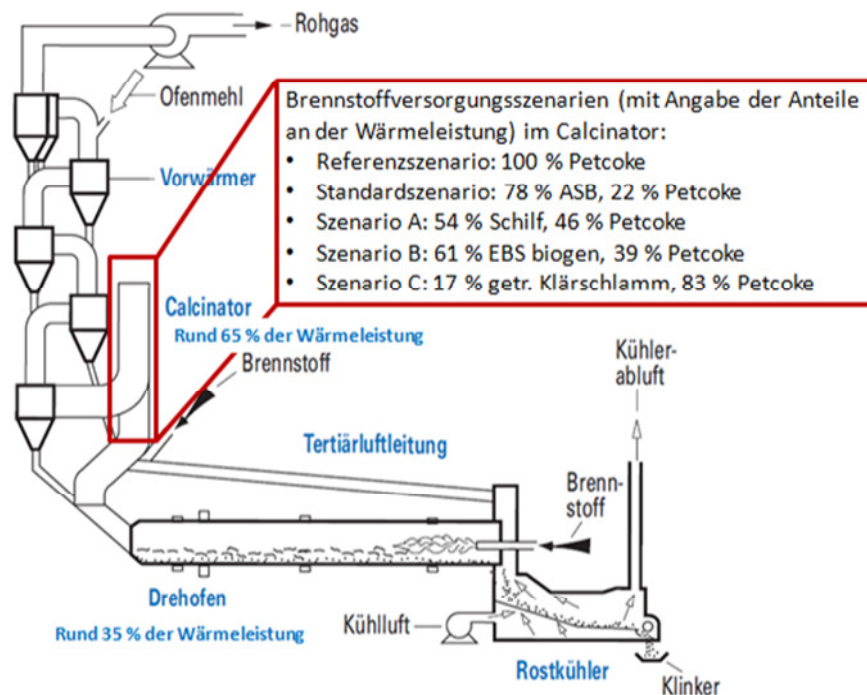


Abbildung 7-3: Verschiedene Brennstoffmix-Szenarien für den Calcinator nach (VDZ, 2008)

Im Fall des Standardszenarios (vgl. Abbildung 7-4) wird etwa 22% der dem Calcinator zugeführten Brennstoffmenge mittels PetCoke eingebracht, während die restlichen 78% dem Prozess über aufbereiteten Substitut-Brennstoff (ASB) zugeführt werden. Im Vergleich dazu, liegt der PetCoke-Anteil beim Einsatz von Schilf als Ersatzbrennstoff (Szenario A) bei 46%.

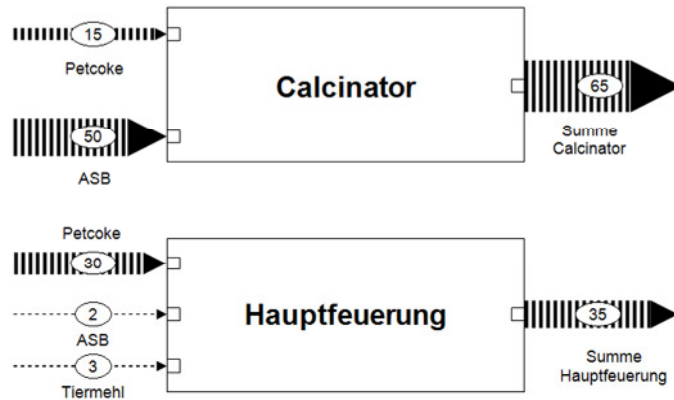


Abbildung 7-4: Brennstoffmix „Standard-Szenario“ (Angaben als Anteil an der zugeführten Gesamtenergie)

Für die Ermittlung der Grenzvermeidungskosten wurden die einzelnen Brennstoffversorgungsszenarios in Hinblick auf auftretende Mehr- bzw. Minderkosten jeweils im Vergleich zum Referenzszenario betrachtet. Als Mehrkosten fallen hier erhöhte Brennstoffgestehungskosten bzw. im Fall des Szenarios C auch weitere erforderliche Investitionen und Betriebskosten an. Als Minderkosten sind im Wesentlichen Einsparungen infolge vermiedener CO_{2,fossil} Emissionen zu nennen. Tabelle 7-4 stellt die technischen Eingangsdaten für die Analyse der Auswirkungen des jeweiligen Brennstoffmix dar.

Tabelle 7-4: Eingangsdaten für die Analyse der Grenzvermeidungskosten in den betrachteten Szenarien

	Einheit	Referenz-Szenario	Standard-Szenario		Szenario A		Szenario B		Szenario C	
		Pet-Coke	Fluff ¹⁾	Pet-Coke	Schilf	Pet-Coke	EBS ²⁾	Pet-Coke	KS ³⁾	Pet-Coke
Einsatzmenge / h (PetCoke=100%)	[%]	100,0	125,9	21,8	139,3	42,2	167,8	47,7	42,7	84,2
Anteil an BWL ⁴⁾ im Calcinator	[%]	100,0	78,2	21,8	57,8	42,2	52,3	47,7	15,8	84,2
Wassergehalt bei Einsatz ⁵⁾	[%]	7,0	12,0	7,0	16,7	7,0	17,5	7,0	10,0	7,0
Heizwert ⁵⁾	[GJ/t _{Brennst.,FM}]	33,0	20,5	33,0	13,7	33,0	10,3	33,0	12,2	33,0
Emissionsfaktor ⁵⁾	[t _{CO2,foss./t_{Brennst.,FM}}]	3,0	1,4	3,0	0,0	3,0	0,4	3,0	0,0	3,0

1) hochkalorischer Ersatzbrennstoff (Kunststofflocken)
 2) Ersatzbrennstoff (EBS) mit erhöhtem biogenen Anteil, vgl. (Pieber et al., 2012)
 3) Klärschlamm (KS, getrocknet)
 4) BWL = Brennstoffwärmeleistung
 5) Datenquellen: PetCoke (Conn & Vatsky, 2005), EBS (Pieber et al., 2012), Klärschlamm (Rößinger, 2008)

Die Ergebnisse aus der Berechnung der Grenzvermeidungskosten sind in Tabelle 7-5 dargestellt.

Tabelle 7-5: Grenzvermeidungskosten der betrachteten Szenarien unter den getroffenen Annahmen.

	Einheit	Standard-szenario	Szenario A	Szenario B	Szenario C
Emittierte Menge CO _{2,fossil} bzw. Zertifikats-kosten (Basis 8,- €/tCO _{2,fossil}) im Vergleich zum Referenzszenario (=100%)	[%]	82,3	42,2	69,1	84,2
Brennstoffkosten im Vergleich zum Referenzszenario (=100%)	[%]	50,0	235,1	66,5	59,7
Gesamtkosten im Vergleich zum Referenzszenario (=100%)	[%]	55,8	200,4	67,0	92,5
Grenzvermeidungskosten im Vergleich zum Referenzszenario	[€/t CO _{2,fossil}]	-111,3	77,4	-47,5	-21,0

Der Brennstoffmix mit Schilf (Szenario C) weist dabei (aufgrund der hohen Brennstoff-Gestehungskosten, vgl. Tabelle 7-4) die höchsten Grenzvermeidungskosten auf.

Um Änderungen des Marktumfelds (Energiekosten (konventionelle Energieträger und alternative Brennstoffe), CO_{2,fossil}-Emissionsrechte, ...) abzubilden wurden entsprechende Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Im Rahmen dessen wurde der Einfluss einzelner isolierter Faktoren auf die Grenzvermeidungskosten für die jeweils betrachteten Brennstoffversorgungs-szenarien evaluiert. Als wesentlicher relevanter Faktor wurden hier die Kosten der jeweiligen betrachteten alternativen Brennstoffe sowohl nach unten als auch nach oben variiert und die entsprechenden Auswirkung auf die Grenzvermeidungskosten betrachtet. Um als weiteren Einflussfaktor Änderungen des Marktpreises von CO_{2,fossil}-Emissionsrechten bzw. Änderungen des Marktpreises des Referenzbrennstoffs ebenfalls beurteilen zu können, wurden die Szenarien mit jeweils drei unterschiedlichen Marktpreisen für CO₂-Zertifikate bzw. dem Referenzbrennstoff PetCoke durchgerechnet. Da in den einzelnen Szenarios unterschiedliche Mengen des Referenzbrennstoffs PetCoke zum Einsatz kommen und entsprechend der Zusammensetzung des Brennstoffmix unterschiedliche Mengen an CO_{2,fossil} emittiert werden, kann aufgrund dieser Betrachtung eine etwaige Veränderung der Priorisierung der einzelnen Maßnahmen durch geänderte Marktbedingungen beurteilt werden.

7.2.2.1 Variabilität der Grenzvermeidungskosten bei unterschiedlichen CO₂-Zertifikatekosten

Für die Ermittlung der Sensitivität der CO_{2,fossil}-Grenzvermeidungskosten wurden eine Steigerung sowie ein Abfallen der Gestehungskosten für die jeweils zur Anwendung kommenden Alternativbrennstoffe sowie drei unterschiedliche Preisniveaus für CO₂-Emissionsrechte analysiert. Unabhängig vom betrachteten Szenario führt ein Steigen der Brennstoffgestehungskosten zu einer Erhöhung und ein Fallen der Brennstoffgestehungskosten zu einer Senkung der CO_{2,fossil}-Grenzvermeidungskosten.

Abbildung 7-5 ist zu entnehmen, dass in Abhängigkeit der CO₂-Zertifikatekosten bei einer Reduktion der Brennstoffgestehungskosten von Schilf um ca. 30 - 60 % auch in Szenario A negative Grenzvermeidungskosten zu erzielen sind (Basisdaten entspr. (Herr, 2012)). Steigerungen der Kosten

für CO₂-Emissionsrechte führen unmittelbar zu einer Verringerung der Grenzvermeidungskosten aufgrund der Erhöhung der Einsparungen im Bereich der Kosten für Emissionsrechte im Vergleich zum Referenzszenario.

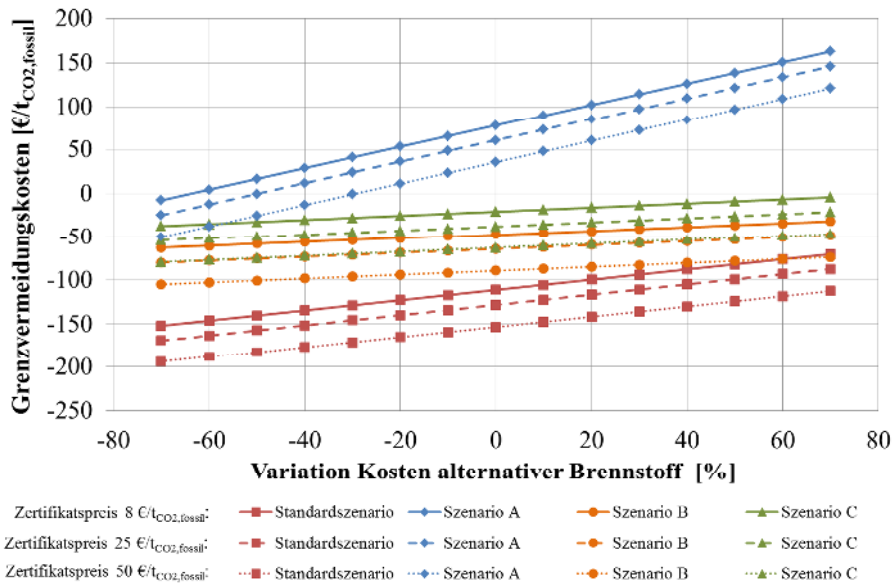


Abbildung 7-5: Sensitivitätsanalyse der CO_{2,fossil}-Grenzvermeidungskosten in Abhängigkeit der Kosten für die jeweiligen alternativen Brennstoffe bzw. den Kosten für CO₂-Emissionsrechte

7.2.2.2 Variabilität der Grenzvermeidungskosten bei unterschiedlichen Kosten des Referenzbrennstoffs

In einer weiteren Betrachtung wurde auch die Sensitivität des Ergebnisses in Abhängigkeit der Brennstoffgestehungskosten für den Regelbrennstoff (PetCoke) analysiert. Nachdem von einem Anstieg der Gestehungskosten für fossile Energieträger auszugehen ist und die Entwicklung des Preises von PetCoke mit der Preisentwicklung fossiler Energieträger korreliert, ermöglicht diese Betrachtung die Beurteilung der Entwicklung der Grenzvermeidungskosten bei steigenden Energiepreisen. Der Preis für PetCoke stieg im Zeitraum 2003 bis 2010 um etwa 300 % an (bezogen auf den Jahresdurchschnittspreis aus dem Jahr 2003) (Satterthwaite, 2012).

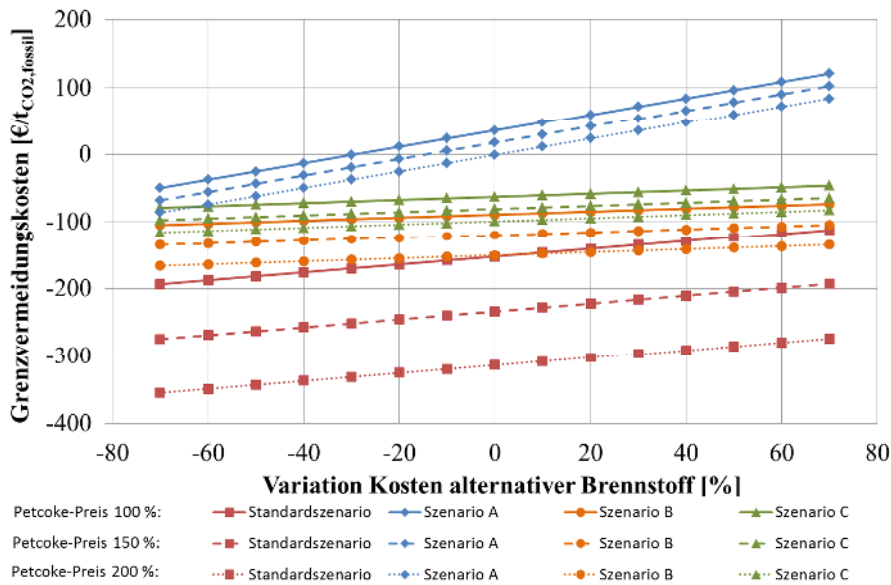


Abbildung 7-6: Sensitivitätsanalyse der CO_{2,fossil}-Grenzvermeidungskosten in Abhängigkeit der Kosten für die alternativen Brennstoffe bzw. den Kosten für PetCoke

7.2.2.3 Grenzvermeidungskosten für CO_{2,fossil} für den Einsatz von Schilfasche

Neben der energetischen Nutzung von Schilf wurde im Projekt ENEREED auch die stoffliche Verwertung von Schilfasche (z. B. nach einer Schilfverbrennung in einem Biomasseheiz(kraft)werk) in der Zementindustrie betrachtet. Für die Berechnung der Grenzvermeidungskosten der Aschenverwertung wurde ein Referenzszenario geschaffen, in dem keine Substitution von Rohmehl durch einen alternativen Rohstoff erfolgte. Die Gesamtkosten für das Referenz-Rohmehl setzen sich aus den Kosten je Tonne eingesetztem Rohmehl und den Kosten für die CO₂-Zertifikate zusammen (die Kostenaufteilung liegt bei 65:35).

Da sich Schilfasche nicht als Zumahlstoff eignet (vgl. Kapitel 6.1.1.2) wurde im Schilfascheszenario ein Teil des Rohmeihls durch Schilfasche ersetzt. Der limitierende Faktor für die Substitution liegt in diesem Fall vor allem in der Verfügbarkeit der Schilfasche. Bei einer jährlich ökologisch vertretbar zu erntenden Menge von 36.000 t Schilf am Neusiedlersee (Brunner, 2008) und einem Aschegehalt von Schilf von durchschnittlich 7% ergibt sich eine jährlich verfügbare Schilfaschemenge von etwa 2.600 t. Damit könnten im Mittel rund 0,23% der stündlichen im Zementwerk Mannersdorf benötigten Rohmehlmenge ersetzt werden und in weiterer Folge rund 0,23% der durch die aus der Carbonisierung entstehenden geogen bedingten CO_{2,fossil}-Emissionen verursachten Zertifikatskosten eingespart werden. Zusätzlich zu den Einsparungen im Bereich der CO₂-Zertifikate kommen in diesem Fall noch Erlöse für die Verwertung der Schilfasche im Zementwerk hinzu.

In Summe ergeben sich für Verwertung von Schilfasche als Rohmehlersatz Grenzvermeidungskosten von rund -83 €/tCO_{2,fossil}.

7.2.2.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen zu den Grenzvermeidungskosten

Anhand der ermittelten Grenzvermeidungskosten und des jeweils möglichen Vermeidungspotentials an CO_{2,fossil}-Emissionen lässt sich eine Grenzvermeidungskostenkurve darstellen, aus der unmittelbar die unter den getroffenen Annahmen sich ergebende Priorisierung der Szenarien ableiten lässt (vgl. Abbildung 7-7).

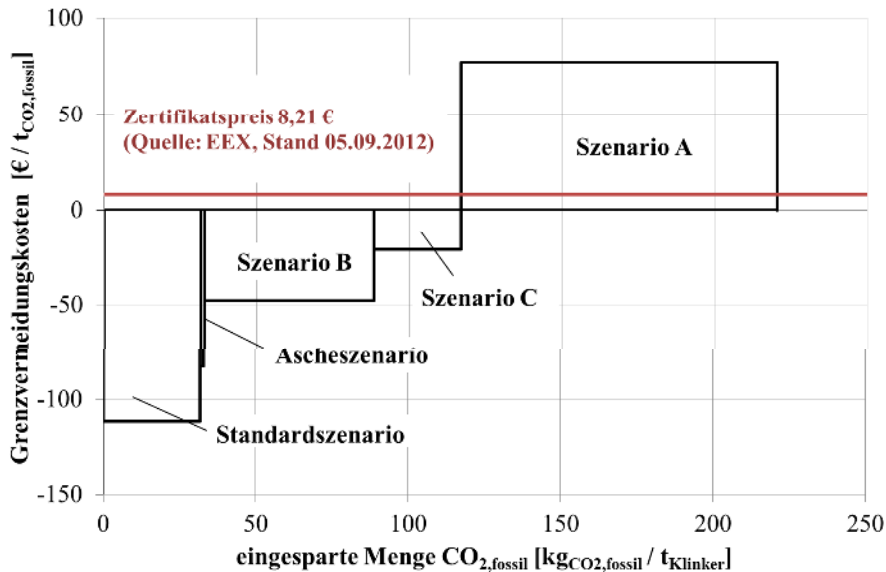


Abbildung 7-7: Grenzvermeidungskostenkurve der energetischen Nutzung von Schilf bzw. der stofflichen Nutzung von Schilfasche im Vergleich zu den betrachteten Brennstoffmix-Szenarios und dem Preis von CO₂-Emissionsrechten (EEX, 2012)

Abschließend kann für die Grenzvermeidungskosten bei der energetischen Nutzung von Schilf festgehalten werden, dass diese im Vergleich die Höchsten waren, was auf den hohen Brennstoffgestehungskosten zurückzuführen ist. Gleichzeitig hat die Verwertung von Schilf als Brennstoff das höchste Einsparpotential an CO_{2,fossil}-Emissionen in diesem Vergleich. Da die hier betrachteten Brennstoffversorgungs-szenarios nicht additiv zur Anwendung kommen können, sondern alternativ zu betrachten sind, sind zu den derzeit gegebenen Marktbedingungen die anderen Alternativbrennstoffe dem Schilf als alternativen Brennstoff vorzuziehen.

Ein wirtschaftlich interessanter Einsatz von Schilf liegt in der Rohmehlsubstitution durch die stoffliche Verwertung von Schilfasche. Wegen der niedrigen Einsatzmenge von Schilfasche besteht hier jedoch nur ein sehr geringes Einsparpotenzial in Bezug auf die eingesparte CO_{2,fossil}-Menge/t_{Klinker}.

7.3 Ökologische Bewertung Bereitstellungswege

7.3.1 Bereitstellung Schilf- Häckselgut – Verbrennung Großanlage

Die definierten Bereitstellungsketten für die Herstellung von Häckselgut (Abbildung 7-1) werden anschließend auch ökologisch bewertet und verglichen. Die zugrundeliegende Methodik ist im Kapitel 4.2 beschrieben. Die verschiedenen Bereitstellungswege wurden modelliert bis hin zur thermischen Verwertung in der Großanlage und die jeweiligen Umweltwirkungen untersucht. Die Ergebnisse für Treibhauspotential (100 Jahre), Humantoxizität, Versauerungspotential, Ozonabbaupotential und Feinstaubbildung sind in den Abbildung 7-8 bis Abbildung 7-12 für die Bereitstellungsketten dargestellt.

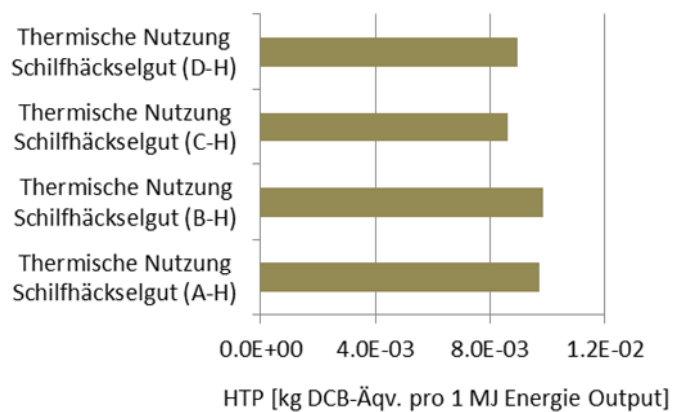
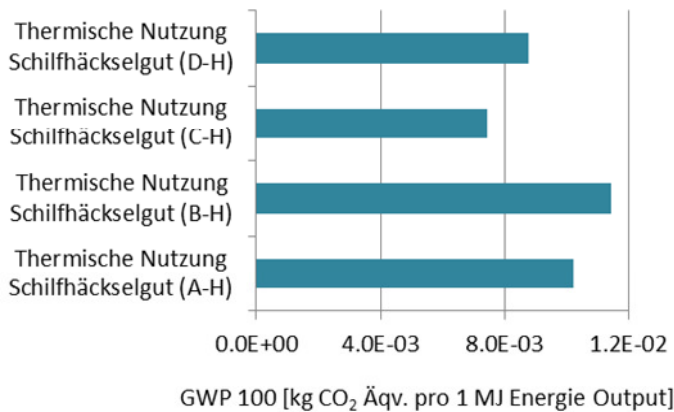


Abbildung 7-8: Treibhauspotential (100 Jahre), thermische Verwertung Schilfhäckselgut in Großanlage (verschiedene Bereitstellungsketten)

Abbildung 7-9: Humantoxizität, thermische Verwertung Schilfhäckselgut in Großanlage (verschiedene Bereitstellungsketten)

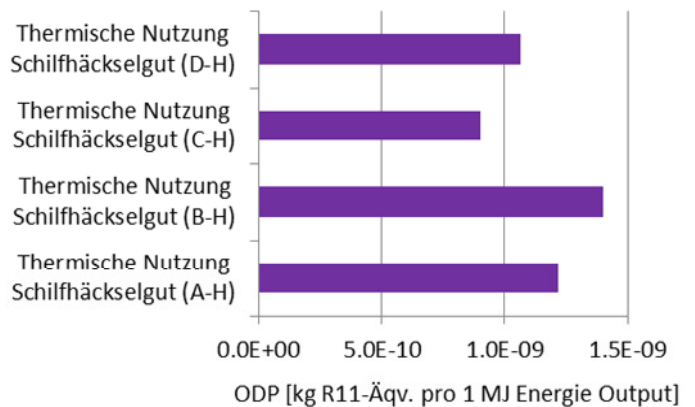
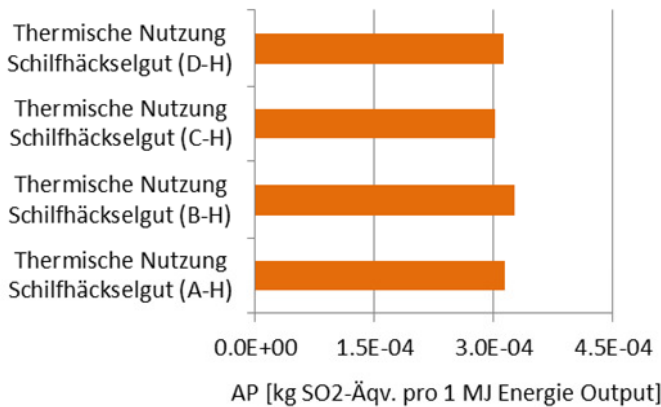


Abbildung 7-10: Versauerungspotential, thermische Verwertung Schilfhäckselgut in Großanlage (verschiedene Bereitstellungsketten)

Abbildung 7-11: Ozonabbaupotential, thermische Verwertung Schilfhäckselgut in Großanlage (verschiedene Bereitstellungsketten)

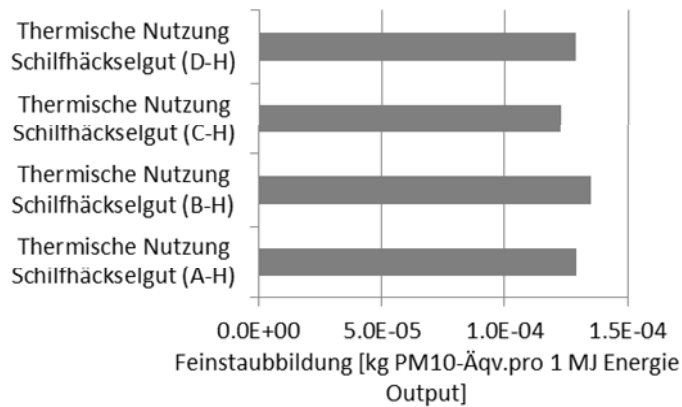


Abbildung 7-12: Feinstaubbildung, thermische Verwertung Schilfhäckselgut in Großanlage (verschiedene Bereitstellungsketten)

7.3.2 Bereitstellung Schilfpellets – Verbrennung Kleinanlage

Die definierten Bereitstellungsketten für die Herstellung von Pellets (Abbildung 7-2) werden anschließend ökologisch bewertet und verglichen. Die zugrundeliegende Methodik ist im Kapitel 4.2 beschrieben.

Die verschiedenen Bereitstellungswege wurden modelliert bis hin zur thermischen Verwertung in der Kleinanlage und die jeweiligen Umweltwirkungen untersucht.

Die Ergebnisse für Treibhauspotential (100 Jahre), Humantoxizität, Versauerungspotential, Ozonabbaupotential und Feinstaubbildung sind in den Abbildung 7-13 bis Abbildung 7-17 für die Bereitstellungsketten dargestellt.

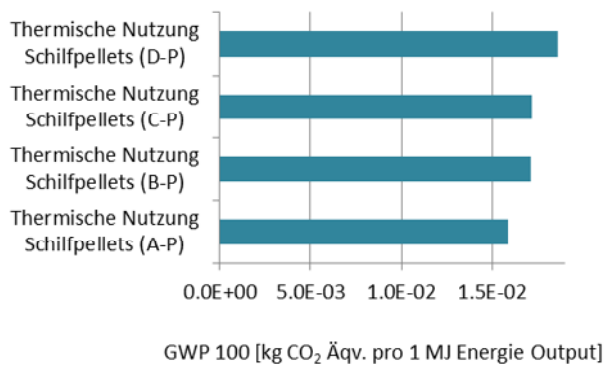


Abbildung 7-13: Treibhauspotential (100 Jahre), thermische Verwertung Schilfpellets in Kleinanlage (verschiedene Bereitstellungsketten)

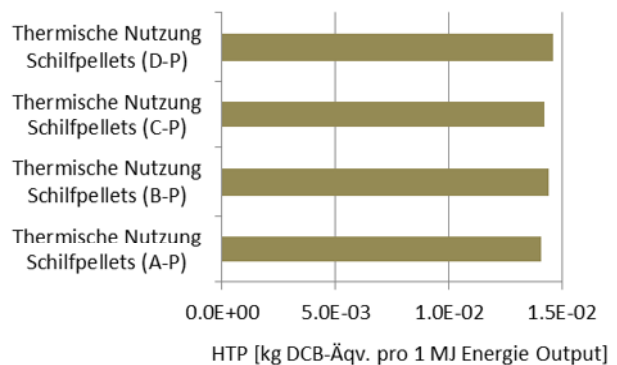


Abbildung 7-14: Humantoxizität, thermische Verwertung Schilfpellets in Kleinanlage (verschiedene Bereitstellungsketten)

Neue Energien 2020 - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

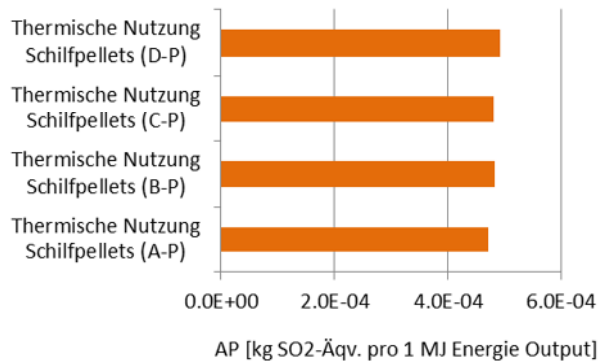


Abbildung 7-15: Versauerungspotential, thermische Verwertung Schilfpellets in Kleinanlage (verschiedene Bereitstellungsketten)

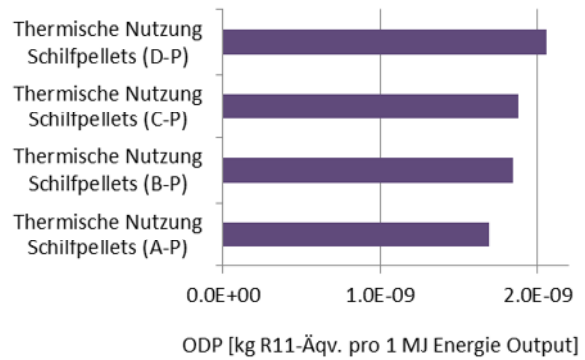


Abbildung 7-16: Ozonabbaupotential, thermische Verwertung Schilfpellets in Kleinanlage (verschiedene Bereitstellungsketten)

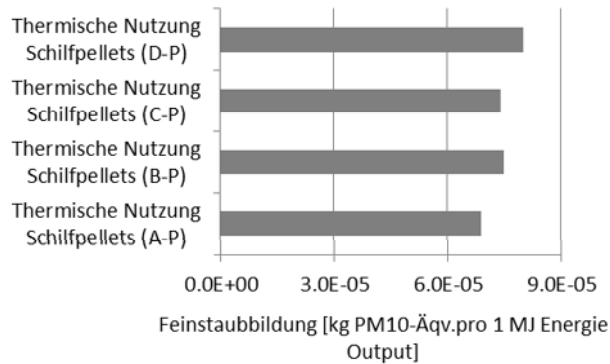


Abbildung 7-17: Feinstaubbildung, thermische Verwertung Schilfpellets in Kleinanlage (verschiedene Bereitstellungsketten)

8 ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Thematik der Erntetechnik erweist sich derzeit als Engpass für die ökonomische Nutzung von Altschilf im größeren Stil. Die bisher praktizierten und untersuchten Lösungen sind zwar verfahrensmäßig adäquat, den Gegebenheiten des Neusiedler Sees gerecht zu werden, jedoch verbleibt die Forderung nach einer effizienten, schlagkräftigen Erntetechnik. Der Erfahrungsaustausch im Laufe des Projekts zeigt, dass derzeit an entsprechenden Lösungen gearbeitet wird, eine solche jedoch bisher am Markt noch nicht verfügbar ist.

Bei der Pelletierung von Schilf zeigt sich, dass die Grenzwerte für Schüttdichte und Abriebsfestigkeit lt. den normativen Vorgaben unter Zugabe von Additiven erreicht werden können. Für den Rohstoff Schilf erwiesen sich Roggenmehl und Soja als besonders vorteilhaft.

Für die thermische Verwertung des Schilfs wurden folgende Erkenntnisse gewonnen: Die Untersuchungen der Asche von Schilf zeigen, dass Schilf einen sehr hohen Ascheerweichungspunkt ($>1300^{\circ}\text{C}$) aufweist. Dieser hohe Ascheerweichungspunkt ist von Vorteil, denn dadurch lässt sich Schilf relativ problemlos in thermochemische Prozesse (Verbrennung, Vergasung) einsetzen. Negativ wirkt sich hingegen der hohe Aschegehalt aus, was speziell im kleinen Anlagensegment zu erhöhtem Betriebsaufwand bzw. auch zu Störungen führen kann.

In der Zementindustrie ist eine Zufeuerung von Schilf in der Calcinatorfeuerung möglich. Der Anteil der Brennstoffwärmeleistung, der in den durchgeführten Versuchen durch den Schilfeinsatz bereitgestellt wurde, beträgt 37,2% bezogen auf den Gesamtprozess. Durch den Schilfeinsatz konnte im Langzeitversuch keine negative Beeinträchtigung der Prozessstabilität, der Klinkerqualität oder der Emissionen festgestellt werden. Es können somit ca. 8 t/h Schilf ohne technische Einschränkung im Zementprozess eingesetzt werden. Probleme bei der Beschickung des Pipe- Conveyors durch zu hohe Staubentwicklung sind anlagenbautechnischer Natur und können mit entsprechenden Adaptionen an der Anlage gelöst werden.

Durch die Vergasungsversuche im Wirbelschichtvergaser konnte gezeigt werden, dass Schilf als Brennstoff für die Dampfvergasung in einem DFB-Vergaser geeignet ist. Der hohe Aschegehalt von Schilf sorgt allerdings dafür, dass gerade bei hohem Schilfanteil im Brennstoff die Umsetzung zu Produktgas leicht rückgängig ist. Zusätzlich haben die Produktgasmessungen gezeigt, dass die Anteile an NH_3 , H_2S und HCl linear mit dem Energieanteil an Schilf zunehmen. Diese lineare Steigung erklärt sich dadurch, dass bei einem höheren Schilfanteil im Brennstoff entsprechend mehr Atome von N, S oder Cl in den Vergasungsreaktor gefördert werden. Diese Elemente werden dann im Vergasungsreaktor zu NH_3 , H_2S und HCl umgewandelt. Des Weiteren zeigten die Teermessungen des Produktgases, dass auch die Teerwerte mit dem Schilfanteil steigen. Dieser Anstieg ist allerdings nur gering.

Die Verbrennungsversuche im Hackgutkessel (Leistung 3 MW) haben aus Sicht der Anlagenbetreiber gut funktioniert. Bis zu einem Energieanteil von 50% Schilf ist keine merkwürdige Änderung des Betriebsverhaltens des Heizwerkes aufgefallen. Möchte man auf Hackschnitzel ausgelegte Heizanlagen mit reinem Schilf betreiben, so müsste das Fördersystem adaptiert werden.

Im kleinen Anlagensegment (Hackgut-/Pellets- Anlage, Leistungsbereich 80kW) empfiehlt sich der Schilfeinsatz in Form von Mischpellets (bis zu 75% Schilfanteil). Die Emissionsgrenzwerte lt. FAV

(Feuerungsanlagenverordnung) können eingehalten werden. Mit steigendem Schilffanteil reduziert sich jedoch die erzielbare Kesselleistung. Auf Grund des hohen Aschegehalts ist mit einem erhöhten Betriebsaufwand für die Kesselreinigung zu rechnen.

Die ökologische Bewertung der verschiedenen Verwertungswege wurde jeweils mit Holz, als erneuerbare Alternative und mit fossilen Energieträgern verglichen. Dieser Vergleich hat gezeigt, dass der Einsatz von Schilf als Substitution von fossilen Energieträgern tendenziell mehr Vorteile bringt als die Substitution eines anderen erneuerbaren Energieträgers. Für die Wirkkategorien Treibhauseffekt, und Ozonabbaupotential können durchwegs Verbesserungspotentiale durch die Substitution von fossilen Energieträgern festgestellt werden. Gegenteilig ist das Bild, wenn die Feinstaubemissionen und das Humatoxizitätspotential betrachtet werden, hier führt die Nutzung von Schilf im Vergleich zu fossilen Energieträgern zu höheren Emissionen und somit auch zu einer Verschlechterung.

Die Bereitstellungskette des Brennstoffes Schilf sowohl in Form von Pellets als auch Häckselgut hin zur thermischen Verwertung wurde auf die Hauptverursacher der Umweltwirkungen untersucht. Den größten Beitrag zum Gesamtergebnis des Treibhauseffektes liefert die Materialbringung inkl. Zerkleinerung, gefolgt von der Pelletierung. Den geringsten Einfluss hat der Transport, was direkt von den zurückgelegten Strecken und der Beschaffenheit - Schüttdichte (Bündel, Häckselgut, Pellets) abhängt.

Aus wirtschaftlicher Sicht ist die Herstellung von Schilf- Häckselgut deutlich kostengünstiger als die Herstellung von Schilfpellets. Werden die Preise Schilf- Häckselgut mit Marktpreisen von Waldhackgut verglichen, zeigt sich, dass die Produktionskosten von Schilf- Häckselgut zwischen 14% und 26% über dem marktüblichen Preis von Hackgut liegen. Bei der Produktion von Schilfpellets liegen die Kosten zwischen 8% und 25% unter dem marktüblichen Preis von Holzpellets. Die Preise von Waldhackgut und Holzpellets wurden in dieser Betrachtung auf Grund des höheren Heizwerts von Holz im Vergleich zu Schilf Heizwert- bereinigt.

Die Grenzvermeidungskostenkurve bei der Nutzung in der Zementindustrie zeigt, dass der Einsatz von Schifasche in der Rohmehlsubstitution wirtschaftlich interessant sein kann. Aufgrund der hohen Brennstoffgestehungskosten ist der Einsatz von Schilf verglichen mit Petrolkoks und Ersatzbrennstoffen zu teuer.

9 AUSBLICK UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Die Thematik der Schilfverwertung, sowohl aus ökologischen Gesichtspunkten, wie dem Schutz und der Erhaltung von Feuchtgebieten, als auch zum Zweck der Nutzbarmachung biogener Ressourcen für die energetische Verwertung, ist Europaweit Thema unterschiedlicher Forschungsaktivitäten. Wissenschaftlicher Austausch erfolgte im Rahmen des Projekts ENEREED u.a. mit Projektträgern und Forschungseinrichtungen in Deutschland, Estland sowie Rumänien. Die Anforderungen an die technologische Umsetzung reichen dabei von relativ einfachen Verfahren für die Ernte bzw. Nutzung in Kaminöfen bis hin zur Zertifizierung von Brennstoffen, z.B. in Form von (Misch-) Pellets und geeigneter Technologien für die Verwertung in automatisierten klein- und mittelgroßen Anlagen.

Speziell im Bereich der Schilfernte fehlen derzeit noch geeignete Technologien, die vielseitig einsetzbar eine effiziente Ernte ermöglichen. Die Ursache dafür ist, dass es sich auf Grund des begrenzten Marktes meist um Eigenentwicklungen bzw. Maschinen in Kleinserie handelt, die speziell für die jeweiligen Bedürfnisse (in der Vergangenheit primär die Qualitätsschilfernte) konzipiert sind. Im Zuge des Projekts wurden Vorversuche mit einer Reihe an geeigneten Komponenten mit vielversprechendem Ergebnis durchgeführt, die als Bausteine für eine neu zu entwickelnde Erntemaschine dienen können. Das Weiterarbeiten auf dem Gebiet der Erntetechnik erfordert eine Erweiterung des Projektteams bzw. der Task-Force um Gruppierungen, die an der Herstellung derartiger Maschinen sowie an der betreiberseitigen Nutzung der neuen Erntetechnik ein vitales Interesse haben.

Ein Einsatz von Schilfpellets in Kleinf Feuerungsanlagen für Haushalte scheint aufgrund des hohen Aschegehaltes von Schilf begrenzt sinnvoll. Die derzeitigen Verbrennungstechnologien im Bereich Pelletsfeuerung bis 30 kW sind für Brennstoffe mit einem Aschegehalt von bis zu 7 Masse-% nicht geeignet. Bei der Weiterverarbeitung zu einem standardisierten Brennstoff, z.B. in Form von (Misch-) Pellets, sind die technischen Möglichkeiten vorhanden und erprobt, derzeit ist der Markt für derartige Brennstoffe allerdings noch in Entwicklung. Weiterhin Forschungsbedarf besteht in der Erprobung unterschiedlicher Mixturen von Rohstoffen aus der Landschaftspflege, Rohstoffen agrarischer Herkunft bzw. holzartiger Biomasse ggf. unter Verwendung unterschiedlicher Additive, mit dem Ziel die verbrennungstechnischen Eigenschaften zu optimieren. Dies könnte im mittleren Anlagensegment (Beheizung größerer Objekte, Nahwärmanlagen) zu einer interessanten Alternative werden.

Aus gesamtheitlicher Sicht (ökologisch, ökonomisch, technisch), ist zum jetzigen Zeitpunkt die Verwertung in einem Biomasse-Heiz(kraft)werk am sinnvollsten. Hier haben die Versuche gezeigt, dass eine Mitverbrennung von bis zu 50% Schilf keine Änderung der Technik erfordert. Eine reine Monoverbrennung von Schilf scheint ebenfalls möglich, erfordert aber eine Änderung der Beschickung. Aus ökologischer Sicht ist eine Substitution von Holz nicht sinnvoll. Wird aber durch die Mitverbrennung von Schilf die Gesamtmenge an thermisch genutzter Biomasse erhöht und die Menge an fossilen Energieträgern reduziert, hat dies eine Verbesserung der Umweltauswirkungen zur Folge.

Ähnliches gilt auch für den Einsatz im Zementwerk. Technisch ist ein Einsatz von Schilf als Brennstoff im Calzinator möglich. Aus ökologischer Sicht aber nur dann sinnvoll, wenn dadurch fossile Energieträger ersetzt werden. Da die Einsatzmöglichkeit von erneuerbaren Energieträgern in den derzeitigen Anlagen beschränkt sind, ist zu befürchten, dass andere erneuerbare Energieträger, wie zum Beispiel Sonnenblumenschalen, substituiert werden.

Hinsichtlich der thermischen Verwertung hat sich die Grundidee des Projekts, nämlich die Erprobung des Einsatzes in marktverfügbaren Anlagentechnologien bzw. Prozessen, als zielführend erwiesen. Die Ergebnisse des Projekts haben sowohl die Möglichkeiten als auch die Grenzen des Einsatzes von Schilf aufgezeigt. Ein logischer nächster Schritt ist die Umsetzung im Rahmen eines Modellprojekts bzw. einer Demonstrationsanlage, wobei durchaus auch vorhandene Infrastruktur für ein entsprechendes Langzeit-Monitoring mit wissenschaftlicher Begleitung genutzt werden kann. Dabei sollte zum einem die Anforderungen an den laufenden Betrieb (z.B. Einflüsse auf die Wartungsintensität), der effiziente und saubere Anlagenbetrieb sowie die Untersuchung der Korrosionsneigung von Anlagenteilen im Zentrum stehen.

Für die Weiterführung im Rahmen eines Folgeprojekts wird eine grenzüberschreitende Kooperation mit den zuständigen Stellen auf der Ungarischen Seite des Neusiedlersees empfohlen. Speziell im Bereich der Erntetechnik bietet sich zur Bündelung der Aktivitäten ein Europaweites Modellprojekt zur Entwicklung einer neuen und effizienten Erntemaschine an.

10 LITERATURVERZEICHNIS

- Bachhiesl, M.; Tauschitz, J.; Zefferer, H. & Zellinger, G. (2001): Mitverbrennung von Sekundärbrennstoffen Verwertung von Biomasse und heizwertreichen Abfallfraktionen als Sekundärbrennstoffe in Wärmekraftwerken. S. 111. Österreichische Elektrizitätswirtschafts-Aktiengesellschaft (Verbund). Wien (Österreich).
- BCG (Hrsg.) (2008): Assessment of the Impact of the 2013-2020 ETS Proposal on the European Cement Industry. Studie im Auftrag von Cembureau, Final Project Report. The Boston Consulting Group (BCG).
- Beckmann, G. und Krail, J. (2013): Harvesting technologies for reeds in Austria. Int. Conf. on the Utilization of Emergent Wetland Plants: Reed as a Renewable Resource. 14. - 16.02.2013. Greifswald (Deutschland).
- Beckmann, M.; Krüger, S.; Gebauer, K.; Pohl, M.; Spiegel, W. & Müller, W. (2009): Methoden der Korrosionsdiagnose bei der Verbrennung schwieriger Brennstoffe. S. 443–460. In Energie aus Abfall, Band 6. TK Verlag. Dresden (Deutschland).
- Biomasseaktionsplan (2006): Nationaler Biomasseaktionsplan für Österreich – Begutachtungsentwurf. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien (Österreich).
- Brandweiner, O. (2006): Thermische Nutzung von Schilf im Zementwerk Mannersdorf. Diplomarbeit Fachhochschule Burgenland GmbH. Pinkafeld (Österreich).
- Bridgwater, A.; Hofbauer, H. & Loo, S. v. (2009): Thermal Biomass Conversion. CLP Press. United Kingdom.
- Brunner, C.; Koch R.; Hacker J.; Hotwagner, M.; Kleinhapfl, R.; Sabara, D.; Traupmann, P.; Holzer, W.; Sattler H.; Stummer, H.; Geyer, J.; Peischl, G.; Paar K. & Kockert, R. (2008): Leitfaden für Logistiksysteme und Rohstoffmanagement im Burgenland. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT). Wien (Österreich).
- Burgenländisches Landschaftspflegegesetz (1990): Gesamte Rechtsvorschrift für Burgenländisches Naturschutz- und Landschaftspflegegesetz. Fassung vom 30.09.2013. Amt der Burgenländischen Landesregierung. Eisenstadt (Österreich).
- AAV (2010): Änderung der Abfallverbrennungsverordnung (AVV Novelle 2010). BGBl. II Nr.476/2010. Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien (Österreich).
- AWG (2002): Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft. BGBl. I Nr. 102/2002. Wien (Österreich).
- Conn, R. & Vatsky, J. (2005): Low NO_x combustion systems for minimizing NO_x and fly ash: Wall-firing petcoke and t-firing severe slagging coal. Lexington Kentucky (United States).

- Diexer, P. (2011): Alternative Einsatzstoffe in der Zementindustrie - Einsatz von Nawaros. Persönliche Mitteilung per E-Mail vom 17.03.2011.
- DIN EN 14961-6 (2012): Feste Biobrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen - Teil 6: Nicht-holzartige Pellets für nichtindustrielle Verwendung. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin (Deutschland).
- Ecoinvent (2007): Database Ecoinvent v2.1. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. St. Gallen (Schweiz).
- E-Control (Hrsg.) (2012): Die 20-20-20-Ziele. <http://www.e-control.at/de/konsumenten/oeko-energie/klima-und-umwelt/20-20-20-ziele>. Energie-Control Austria für die Regulierung der Elektrizitäts- und Erdgaswirtschaft (E-Control). Online am 8.9.2012. Wien (Österreich).
- EEX (Hrsg.) (2012): EU Emission Allowances – Spotmarkt. <http://www.eex.com/de/Marktdaten/Handelsdaten/Emissionsrechte>. European Energy Exchange AG (EEX). Online am 05.09.2012. Leipzig (Deutschland).
- Ehrenberg, C. (2011): Messaufzeichnungen zur Versuchsplanung - Schilfeinsatz am Zementwerk. Persönliche Mitteilung per E-Mail vom 06.04.2011.
- Emissionshandelsrichtlinie (2009): Richtlinie 2009/29/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG zwecks Verbesserung und Ausweitung des Gemeinschaftssystems für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten. Amtsblatt der Europäischen Union Nr. L 140. Brüssel (Belgien).
- EN ISO 14040 (2006): Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. European Committee for Standardization (CEN). Brüssel (Belgien).
- EN ISO 14044 (2006) Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen. European Committee for Standardization (CEN). Brüssel (Belgien).
- FAV (2011): Feuerungsanlagen-Verordnung (FAV). BGBl. II Nr. 312/2011. Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten. Wien (Österreich).
- Führer, E. (2010): Schnittpunkte der Schilfwirtschaft und des Naturschutzes am Neusiedler See. Diplomarbeit - Universität für Bodenkultur Wien - Department für Raum, Landschaft und Infrastruktur - Institut für Landschaftsentwicklung, Erholungs- und Naturschutzplanung. Wien (Österreich).
- Gamauf, N. (2000): Satellitenbildauswertung des Schilfgürtels am Neusiedler See zur Ermittlung von Rohstoffpotenzialen. Universität für Bodenkultur - Institut für Land-, Umwelt-, und Energietechnik. Wien (Österreich).
- Goedkoop, M.; Heijungs, R.; Huijbregts, M.; Schryver, A.; Struijs, J. & van Zelm, R. (2012): ReCiPe 2008 - A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: Characterisation. Ruimte en Milieu, Ministerie van Volkshuivering, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer. Amersfoort, Leiden, Nijmegen, Bilthoven (Niederlande).

- Gold, D. (2012): Untersuchung der Auswirkungen von Materialkonditionierung und Pelletierhilfsmitteln auf den Pellets- Produktionsprozess. Masterarbeit Fachhochschule Burgenland GmbH. Pinkafeld (Österreich).
- Grassl, E. (2013): Transportkosten LKW- Transport. Persönliche Mitteilung per E-Mail vom 20.03.2013.
- Grath, H. (2011): ENEREED - Klärung des abfallrechtlichen Stellenwerts von Schilf. Persönliche Mitteilung per E-Mail an DI Helmut Rojacz vom 11.05.2011.
- Greifswald (2013): Int. Conf. on the Utilization of Emergent Wetland Plants: Reed as a Renewable Resource. 14. - 16.02.2013 (insb. die Vorträge: Beckmann, G.; Dubowski, A.; Krail, J.; Rixrath D. und Wichmann S.). Greifswald (Deutschland).
- Guinée, J. (Hrsg.); Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Kleijn, R.; de Koning, A.; van Oers, L.; Wegener Sleeswijk, A.; Suh, S.; de Haes H.; de Bruijn, H.; van Duin, R. & Huijbregts M. (2002): Handbook on Life Cycle Assessment Operational Guide to the ISO Standards. Kulwer Academix Publishers. Dordrecht (Netherlands).
- Hartmann, H. (1996): Analyse und Bewertung der Systeme zur Hochdruckverdichtung von Halmgut. Landtechnische Berichte aus Praxis und Forschung. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. München (Deutschland).
- Hartmann, H.; Böhm, T. & Maier, L. (2000): Naturbelassene biogene Festbrennstoffe - umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.). München (Deutschland).
- Herr, G. (2012): Ökonomische Bewertung der energetischen Verwertung von Schilf aus dem Raum Neusiedler See. Masterarbeit Fachhochschule Burgenland GmbH. Pinkafeld (Österreich).
- Herz (Hrsg.) (2010): HERZ Firematic - Schnittmodell. HERZ Energietechnik GmbH. Pinkafeld (Österreich).
- Hiss Reet (Hrsg.). (2009): Hiss Reet - Homepage der Firma Hiss Reet eK. www.hiss-reet.de. Online am 2.11.2009.
- Hubacek, K. & Bauer, W. (1997): Der Einsatz ökonomischer Anreizmaßnahmen bei der Errichtung des Nationalparks Neusiedlersee Seewinkel. Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie. Wien (Österreich).
- Jenkins, B.; Baxter, L.; Miles Jr., T & Miles, T. (1998): Combustion properties of biomass. Fuel processing technology, 54, S. 17–46. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382097000593>
- Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. & Hofbauer, H. (2009a): Energie aus Biomasse. 2. Auflage. Springer Verlag. Heidelberg, London, New York.
- Kaltschmitt, M., Hartmann, H. und Obernberger, I. (2009b): Leitfaden Bioenergie - Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. In Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrg.). Gülzow (Deutschland).

- Koglbauer, G. (2011): Verwertung und Auswirkungen von Schilf als EBS im Calcinator. Persönliche Mitteilung vom 09.05.2011.
- Kohler, B.; Dvorak, M. & Nemeth, E. (2008): Der Schilfgürtel des Neusiedlersees -Managementplan für einen Lebensraum im Spannungsfeld zwischen wirtschaftlicher Nutzung und Naturschutz. Projektinformation WWF Österreich, BirdLife Österreich.
- Krail, J.; Plank, H.; Ragossnig, A.; Kitzler, H.; Pfeifer C.; Hofbauer H. und Beckmann, G. (2013): ENEREED - Sustainable ENERgy Conversion from REED Biomass - Overview of laboratory and field test results. Int. Conf. on the Utilization of Emergent Wetland Plants: Reed as a Renewable Resource. 14. - 16.02.2013. Greifswald (Deutschland).
- KTBL (2012): Energiepflanzen: Daten für die Planung des Energiepflanzenanbaus, Hrsg, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V, (KTBL). 2, Auflage. Darmstadt (Deutschland).
- Ladinig, E. (2011): Alternative Einsatzstoffe in der Zementindustrie – Beurteilung der Verwertung von Schilf als Ersatzstoff in der Zementindustrie. Masterarbeit Fachhochschule Burgenland GmbH. Pinkafeld (Österreich).
- Lampl, C. (2010): Biomasseasche. Persönliche Mitteilung per E-Mail vom 05.08.2010.
- Lampl, C. (2011): Potenzielle Auswirkungen durch den Schilfeinsatz bei der Zementherstellung. Persönliche Mitteilung per E-Mail vom 18.03.2011.
- Landwirtschaftskammer (2012): Marktbericht XI/2012 - Energieholz (Brennholz-Meterscheite, Waldhackgut) Stand November 2012. Online am 20.06.2013. Wien (Österreich).
- Markowitsch, M. (2011): Schilfverfeuerungsversuch vom 08. Juni 2011. Persönliche Mitteilung per E-Mail vom 15.06.2011.
- Mauschitz, G. & Hackl, A. (2006): Einsatz von Ersatzstoffen in der österreichischen Zementerzeugung. Vortrag: 8. Depo Tech Konferenz - Abfall- und Deponietechnik, Abfallwirtschaft, Altlasten. 22.11 - 24.11.2006. Montanuniversität Leoben, S. 311-318. Leoben (Österreich).
- Mauschitz, G. (2011a): Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie – Berichtsjahr 2010. Verein der österreichischen Zementindustrie e.V. Wien (Österreich).
- Mauschitz, G. (2011b): Nachwachsende Rohstoffe in der Zementindustrie. Persönliche Mitteilung per E-Mail vom 11.02.2011.
- Moser, W. (2009): Energie- und CO₂- Bilanz der Pelletsproduktion. Bioenergy 2020+ GmbH (Hrsg.). Wieselburg (Österreich).
- Nationalpark Neusieder See - Seewinkel (Hrsg.). (2009): Nationalpark Neusiedlersee Seewinkel - Eckdaten. <http://www.nationalpark-neusiedlerseeseewinkel.at/dernationalpark/eckdaten.html>. Online am 27.10.2009.
- Obernberger, I. & Thek, G. (2009): Herstellung und energetische Nutzung von Pellets. Schriftenreihe "Thermische Biomassenutzung". TU Graz - Institut für Prozess- und Partikeltechnik. Graz (Österreich).

- ÖKL (2013): Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung – Richtwerte Online. Abgerufen am 15.03.2013.
- ÖNorm EN 303-5 (1999): Heizkessel – Teil 5: Heizkessel für feste Brennstoffe, hand- und automatisch beschickte Feuerungen, Nenn-Wärmeleistung bis 300 kW. Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung. Österreichisches Normungsinstitut. Wien (Österreich).
- ÖNorm EN 15210-1 (2010): Feste Biobrennstoffe - Bestimmung der mechanischen Festigkeit von Pellets und Briketts. Österreichisches Normungsinstitut. Wien (Österreich).
- ÖNorm EN 15414-1 (2010): Feste Sekundärbrennstoffe. Bestimmung des Wassergehaltes unter Verwendung des Verfahrens der Ofentrocknung. Bestimmung des Gesamtgehaltes an Wasser mittels Referenzverfahren. Österreichisches Normungsinstitut. Wien (Österreich).
- Philipp, G. (2011): Auswirkungen von biogenen Ersatzbrennstoffen wie z. B. Schilf. Persönliche Mitteilung per E-Mail vom 10.02.2011.
- Philipp, G.; Kopecksy, K. & Waschnig, A. (2011): Besprechung am Zementwerk Wopfing (Wopfinger Baustoffindustrie GmbH). Persönliche Mitteilung im Zuge der Besprechung vom 28.01.2011.
- Pfaller, P. (2009): Neusiedlersee Wiki - Schilf. <http://www.neusiedlerseewiki.at/Schilf>. Online am 15.10.2009. Wien (Österreich).
- Pieber, S.; Ragoßnig, A.; Pomberger, R. & Curtis, A. (2012): Biogenic carbon-enriched and pollutant depleted SRF from commercial and pretreated heterogeneous waste generated by NIR sensor-based sorting. In: Waste Management & Research 30/4. S. 381 – 391.
- Plank, H.; Krail, J. und Rath, W. (2013): Energy conversion of reed and wood in domestic wood-chip boilers. World Sustainable Energy Days (WSEDnext) 2013. 27. – 28.02.2013. Wels (Österreich).
- Pro Pellets Austira (2013): Pelletspreis Jahresdurchschnittspreise inflationsbereinigt 2000 bis 2013 – Stand Mai 2013. <http://www.propellets.at/de/pelletpreise>. Online am 20.06.2013. Wien (Österreich).
- Rechberger, C. (2003): Schilf (*Phragmites australis*) - Analyse der Ernte- und Verwertungsmöglichkeiten unter besonderer Berücksichtigung des Neusiedler Sees. Fachhochschule Wr. Neustadt - Studiengang Management im ländlichen Raum / Produkt- und Projektmanagement. Wieselburg (Österreich).
- Rixrath, D.; Wartha, C.; Krail, J. und Pausch, E. (2013): Life Cycle Assessment of Energy Conversion from Reed. Int. Conf. on the Utilization of Emergent Wetland Plants: Reed as a Renewable Resource. 14. - 16.02.2013. Greifswald (Deutschland).
- Robinson, A.; Baxter, L. & Junker, H. (1998): Fireside issues associated with coal-biomass cofiring. <http://infohouse.p2ric.org/ref/19/18953.pdf>
- Rodewald-Rudescu, L. (1974): Das Schilfrohr - *Phragmites communis* TRINIUS. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. Stuttgart (Deutschland).
- Röck, R. (2011): Alternative Einsatzstoffe in der Zementindustrie - Einsatz von Nawaros. Persönliche Mitteilung per E-Mail vom 16.02.2011.

- Rößinger, D. (2008): Chemische Analyse von Ersatzbrennstoffen. Diplomarbeit Staatliche Studienakademie Glauchau. Glauchau (Deutschland).
- Satterthwaite, K. (2012): Economics of petroleum coke in power generation. Roskill Information Services Ltd. London (United Kingdom).
- Schinnerl, S. (2013): Informationen Universalzerkleinerer. Persönliche Mitteilung per Email am 04.04.2013.
- Spangardt, G. & Meyer, J. (2005): Risikomanagement im Emissionshandel. In: Lucht, M. & Spangardt, G. (Hrsg.) Emissionshandel, Springer Verlag. Berlin Heidelberg (Deutschland).
- Spaun, S. (2010): Gespräch und Befragung zur Qualitätskriterien und Grenzen des EBS Einsatzes in der Zementindustrie. Persönliche Mitteilung per Telefon vom 22.01.2010.
- Spaun, S. (2011): Ersatzbrennstoffeinsatz in der österreichischen Zementindustrie (1988 – 2009). Persönliche Mitteilung per Email am 03.07.2011.
- Urch, R. (2013): Informationen Trommelzerkleinerer. Persönliche Mitteilung per E-Mail vom 25.03.2013.
- Verbrennungsverbotsgesetz (1993): Bundesgesetz für das Verbot des Verbrennens biogener Materialien außerhalb von Anlagen. BGBl. 405/1993.
- VDI (Hrsg.) (2013): EU: kurzfristig noch Änderungen für CO₂-Handel möglich, In: VDI-Nachrichten vom 24.05.2013. VDI - Verein Deutscher Ingenieure. Düsseldorf (Deutschland).
- VDZ (Hrsg.) (2008) Zement-Taschenbuch. 51. Ausgabe. Verein Deutscher Zementwerke e.V. Düsseldorf (Deutschland).
- Wichmann, S. & Wichtmann, W. (2009): Energiebiomasse aus den Niedermooren (ENIM) - Endbericht. Institut für Dauerhafte Umweltgerechte Entwicklung von Naturräumen der Erde e.V. (DUENE). Greifswald, Deutschland.
- Wilflingseder, P. (2010): Fa. Zementwerk Leube GmbH. Persönliche Mitteilung per E-Mail vom 18.10.2010.
- Wurst, F. (2011): Besprechung über mögliche Auswirkungen durch den Schilfeinsatz im Zementherstellungsprozess. Persönliche Mitteilung vom 12.04.2011.

11 ANHANG

Tabelle 11-1: Datenbasis für die ökonomische Bewertung

Daten für die ökonomische Bewertung	Wert	Einheit	Quelle
Brennstoffdaten			
Heizwert Schilf ($H_{u,feucht}$)	14,55	[MJ/kg]	Durchschnitt eigene Messungen
Erntefläche und Bewuchs			
Ernte – Flächenbewuchs	10	[t/ha]	eigene Annahme
Ernte – Erntetage pro Periode	60	[d/Ernte-Periode]	Durchschnitt aus (Ladinig, 2011)
Erntefläche – Pacht	0	[€/ha]	eigene Annahme
Personal			
Landarbeiter – Lohnkosten	10,73	[€/h]	nach (KTBL, 2012)
Landarbeiter – Arbeitszeit pro Erntetag	8	[h/d]	eigene Annahme
Treibstoff, Versicherung und Betriebsmittel			
Treibstoff – Kosten	1,11	[€/l]	Stat Austira: ahresdurchschnittspreise und -steuern für die wichtigsten Energieträger 2011
Bündelerntemaschine/ Rundballenerntemaschine/ Sammelfahrzeug – Lebensdauer	12	[a]	nach (KTBL, 2012)
Bündelerntemaschine/ Rundballenerntemaschine/ Sammelfahrzeug – Versicherung	0,01	[%] von Invest.k.	(ÖKL, 2013)
Bündelerntemaschine/ Rundballenerntemaschine/ Sammelfahrzeug – Wartungskosten	0,025	[%] von Invest.k. pro 100h	(ÖKL, 2013) Selbstfahrmäher 350kW
Ernte			
Rundballenerntemaschine Investitionskosten	190.000	[€]	(Wichmann & Wichmann, 2009)
Rundballenerntemaschine – Tagesleistung	11	[t/d]	eigene Messung
Rundballenerntemaschine Dieselverbrauch	10	[l/h]	eigene Messung
Rundballenerntemaschine Personaleinsatz	2	[Personen]	eigene Annahme
Rundballenerntemaschine Rundballennetze	0,382	[€/t]	eigene Messung
Bündelerntemaschine – Investitionskosten	100.000	[€]	eigene Annahme, wie Sammelfahrzeug
Bündelerntemaschine – Tagesleistung	15	[t/d]	eigene Messung
Bündelerntemaschine – Dieselverbrauch	6,25	[l/h]	eigene Messung
Bündelerntemaschine – Personaleinsatz	5	[Personen]	eigene Annahme
Bündelerntemaschine – Ballenstricke	2,27	[€/t]	eigene Messung
Sammelfahrzeug - Investitionskosten		[€/t]	(Brandweiner, 2006)

Tabelle 11-1 forts.: Datenbasis für die ökonomische Bewertung

Daten für die ökonomische Bewertung	Wert	Einheit	Quelle
Lagerung, Verladung und Transport			
Lagerhalle – Investitionskosten (Landw. Scheune)	67,53	[€/m³]	(KTBL, 2012), S. 325
Lagerhalle – Lebensdauer	30	[a]	nach (KTBL, 2012) S. 326
Lagerhalle – Versicherung Gebäude	0,002	[%] von Invest.k.	nach (KTBL, 2012) S. 326
Lagerhalle – Unterhaltung Gebäude	0,01	[%] von Invest.k.	nach (KTBL, 2012) S. 326
Ein/Auslagern – Arbeitszeitbedarf	0,013	[h/t]	nach (KTBL, 2012) S. 326
LKW – Lademenge Bündel	4,8	[t]	eigene Berechnung
LKW – Lademenge Rundballen	4,2	[t]	eigene Berechnung
LKW – Lademenge Häckselgut	10	[t]	eigene Berechnung
LKW – Lademenge Pellets	25	[t]	eigene Berechnung
LKW – Transportkosten (gesamt)	58	[€/h]	(Grassl, 2013)
LKW – Fahrzeit	0,02	[h/km]	eigene Annahme inkl. Be- und Entladen
LKW – Transportdistanz	100	[km]	eigene Annahme
Traktor – Investitionskosten	68000	[€]	(KTBL, 2012), S. 305
Traktor – Auslastung pro Jahr	833,33	[h/a]	nach (KTBL, 2012) S. 305
Traktor - Transportdistanz	5	[km]	eigene Messung
Traktor - Geschwindigkeit	10	[km/h]	eigene Annahme
Traktor - Kraftstoffverbrauch	9,7	[l/h]	nach (KTBL, 2012) S. 305
Traktor - Lademenge Rundballen	2,7	[t]	eigene Messung
Traktor – Lademenge Bündel	1,9	[t]	eigene Messung
Traktor - Wartungskosten	0,0053	[%] von Invest. pro 100h	nach (ÖKL, 2013) um 30% verringert nach Experteneinschätzung
Zerkleinerung und Pelletierung			
Trommelhackmaschine - Investitionskosten	200.000	[€]	(Urch, 2013)
Trommelhackmaschine - Wartungskosten	0,04	[%] von Invest. pro Jahr	(Urch, 2013)
Trommelhackmaschine - Treibstoffverbrauch	65	[l/h]	eigene Messung
Trommelhackmaschine - Häckselleistung	10,54	[t/h]	eigene Messung
Universalzerkleinerer - Investitionskosten	300.000	[€]	(Schinnerl, 2013)
Universalzerkleinerer - Wartungskosten	11,19	[€/h]	(Schinnerl, 2013)
Universalzerkleinerer - Betriebsmittel	5,7	[€/h]	(Schinnerl, 2013)
Universalzerkleinerer - Treibstoffverbrauch	65	[l/h]	eigene Messung
Universalzerkleinerer - Häckselleistung	7,21	[t/h]	eigene Messung
Trommelhackmaschine/ Universalzerkleinerer - Personalbedarf	1	[Personen]	eigene Annahme
Trommelhackmaschine/ Universalzerkleinerer - Auslastung pro Jahr	900	[h/a]	(ÖKL, 2013) Hackgutmaschinen bis 80 cm Ø Motor, Kran u. LKW-Aufbau
Trommelhackmaschine/ Universalzerkleinerer - Lebensdauer	12	[a]	nach (KTBL, 2012)
Pelletsproduktion - Produktionskosten	38,27	[€/t]	(Oberberger & Thek, 2009)

12 KONTAKTDATEN

Lead- Partner:

Fachhochschule Burgenland GmbH
Kernkompetenzbereich Energie- und Umweltmanagement
Steinamangerstraße 21
A-7423 Pinkafeld
Tel.: +43/3357/45370-0
Fax.: +43/3357/45370-1010
Web: www.fh-burgenland.at

Projektleiter:

DI DI(FH) Jürgen Krail
Mail: juergen.krail@fh-burgenland.at

Projektpartner :

Technische Universität Wien
Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Techn. Biowissenschaften
Getreidemarkt 9/166
A-1060 Wien
Tel.: +43/1/58801-16600
Fax.: +43/1/58801-16699
Web: www.vt.tuwien.ac.at

Kontakt :

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hermann Hofbauer
Mail : hermann.hofbauer@tuwien.ac.at

Projektpartner :

Technisches Büro für Maschinenbau und Energietechnik Beckmann
Anton Baumgartner Str. 44/B7/016
A-1230 Wien
Tel: +43/699/19230160
Fax: +43/1/9230160

Kontakt:

Dr. Georg Beckmann
Mail: georg.beckmann@chello.at