Abschlußbericht zum Verbundvorhaben *BioLog – Entwicklung, Erprobung und Demonstration neuer Logistikkonzepte für Biobrennstoffe*

Energetische Nutzung aufbereiteter Produkte aus dem Energiepflanzenanbau, ökonomische und ökologische Begleitforschung, Projektkoordination

Fördermittelgeber:

***BMELV* - Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz** (Berlin) über ***FNR* - Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.** (Gülzow)

Projekt-Nr.: 2 60 2261

Förderkennzeichen: 220 031 905

Berichtszeitraum: 1.08.2006 bis 31.12.2008

04. März 2009

Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH
– CUTEC-Institut GmbH –
Leibnizstr. 21 + 23
D-38678 Clausthal-Zellerfeld

Tel. (05323) 933-0
Fax (05323) 933-100
Internet: www.cutec.de

Inhaltsverzeichnis

I. PROJEKTKOORDINATION - 6 -

I.1 AUFGABENSTELLUNG - 6 -

I.2 VERTRAGSGESTALTUNG DES VERBUNDVORHABENS - 6 -

I.3 PROJEKTORGANISATION - 8 -

I.4 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT - 9 -

I.6 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS - 11 -

I.7 ABBILDUNGSVERZEICHNIS - 11 -

II. ENERGETISCHE NUTZUNG VON ENERGIEPFLANZENPELLETS - 12 -

II.1 AUFGABENSTELLUNG - 12 -

II.2 BRENNSTOFFANALYSEN - 13 -

II.3 ANLAGENBESCHREIBUNG - 16 -

II.3.1 ANLAGE ZUR SYNTHESEGASERZEUGUNG - 16 -

II.3.2 UMSETZUNG IN FÜHLBARE WÄRME - 17 -

II.4 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG - 18 -

II.4.1 ZIRKULIERENDE WIRBELSCHICHT - 18 -

II.4.1.1 VERSUCHE MIT DEN PELLETS DER SELBELANG-VERSUCHE - 18 -

II.4.1.2 ERGÄNZUNGSVERSUCHE MIT HOLZ - 19 -

II.4.2 RÜCKSCHUBROST - 20 -

II.5 VERSUCHSERGEBNISSE - 22 -

II.5.1 VERGASUNG - 22 -

II.5.1.1 BETRIEBSERFAHRUNGEN - 22 -

II.5.1.2 MATERIAL DER SELBELANG I-WOCHE - 24 -

II.5.1.3 MATERIAL DER SELBELANG II-WOCHE - 33 -

II.5.1.4 VARIATION VON VERFAHRENSPARAMETERN AM BRENNSTOFF HOLZ - 38 -

II.5.2 VERBRENNUNG - 42 -

II.5.2.1 BETRIEBSERFAHRUNGEN - 42 -

II.5.2.2 ASCHEANALYSEN - 44 -
II.5.2.3 EMISSIONSWERTE - 46 -

II.6 VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE - 48 -

II.7 DRUCKVERGASUNG - 49 -

II.7.1 EINLEITUNG - 49 -

II.7.2 THEORIE DER DRUCKVERGASUNG - 49 -

II.7.3 PROBLEM-DISKUSSION - 51 -

II.7.3.1 ALLGEMEINES - 51 -
II.7.3.2 EINTRAG VON BIOMASSE IN DRUCKAUFGELADENE REAKTOREN - 51 -
II.7.3.3 DISKUSSION DER DRUCK- UND TEMPERATURABHÄNGIGKEIT IM HINBLICK AUF DIE PRODUKTION VON STROM UND FT-KRAFTSTOFFEN - 51 -

II.7.4 BESTEHENDE ANLAGEN: DRUCKVERGASUNG – KOHLE - 52 -

II.7.4.1 ÜBERSICHT - 52 -
II.7.4.2 HÜRTH-BERRENRATH – DRUCKAUFGELADENE HTW-VERGASUNG - 53 -

II.7.5 BESTEHENDE ANLAGEN – DRUCKVERGASUNG – BIOMASSE - 53 -

II.7.5.1 VÄRNAMO – DRUCKAUFGELADENE ZIRKULIERENDE WIRBELSCHICHT - 53 -

II.7.6 AKTUELLE F&E-ARBEITEN / ENTWICKLUNGSAKTIVITÄTEN - 55 -

II.7.6.1 SCHWARZE PUMPE (FZK): FLUGSTROM-DRUCKVERGASER - 55 -
II.7.6.2 IGCC-CCS KOHLEKRAFTWERK MIT CO_2-ABTRENNUNG UND SPEICHERUNG - 56 -
II.7.6.3 CHOREN CARBO-V-PROZESS – FLUGSTROMVERGASUNG - 57 -
II.7.6.4 VÄRNAMO / VVBGC - 58 -
II.7.6.5 DAS BTL-PROJEKT DER TU BERGAKADEMIE FREIBERG - 58 -
II.7.6.6 BIOMASS HEATPIPE REFORMER - 59 -
II.7.6.7 VERGASUNG IN ÜBERKRITISCHEM WASSER - 60 -

II.7.7 PATENTRECHERCHE: VERGASUNG / VERBRENNUNG - 62 -

II.7.7.1 VORBEMERKUNG - 62 -
II.7.7.2 DRUCKAUFGELADENE VERGASERAPPARATE - 62 -

II.9 VERWENDETE UNTERLAGEN - 66 -

II.9.1 LITERATURSTELLEN - 66 -

II.9.2 PATENT- UND OFFENLEGUNGSSCHRIFTEN - 67 -

II.10 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS - 70 -

II.11 ABBILDUNGSVERZEICHNIS - 71 -

II.12 TABELLENVERZEICHNIS - 73 -

III. BEGLEITFORSCHUNG VON DER SILAGE BIS ZUM PELLET - 74 -

III.1 EINLEITUNG - 74 -

III.2 GEFÄßVERSUCHE ZUR PFLANZENBAULICHEN NUTZUNG DER NEBENPRODUKTE - 75 -

III.2.1 MATERIAL UND METHODEN - 75 -

III.2.1.1 DÜNGUNGSSTUFEN - 76 -
III.2.1.2 PRÜFSUBSTRATE - 77 -
III.2.1.3 VERSUCHSBÖDEN - 79 -
III.2.1.4 VERSUCHSPFLANZEN - 81 -
III.2.1.5 VERSUCHSANLAGE - 82 -

III.2.2 ERGEBNISSE UND DISKUSSION - 86 -

III.2.2.1 VERSUCH 1: PRESSSAFT 2007 - 87 -
III.2.2.2 VERSUCH 2: PRESSSAFT 2007 - 90 -
III.2.2.3 VERSUCH 4: PRESSSAFT - 93 -
III.2.2.4 VERSUCH 5: GÄRRÜCKSTAND 2008 - 96 -
III.2.2.5 VERSUCH 3: ASCHE 2007 - 97 -
III.2.2.6 VERSUCH 6: ASCHE 2008 - 99 -

III.2.3 ÜBERLEGUNGEN ZUR PRAKTISCHEN DÜNGUNG MIT BIOLOG-NEBENPRODUKTEN - 102 -

III.2.4 ZUSAMMENFASSUNG GEFÄßVERSUCHE - 103 -

III.3 ÖKONOMIE VOM ANBAU BIS ZUM PELLET - 105 -

III.3.1 MATERIAL UND METHODEN - 105 -

III.3.1.1 FRUCHTARTEN: AUSWAHL UND ERTRÄGE - 105 -
III.3.1.2 ANLAGENGRÖßEN UND MASSENFLUSS - 105 -
III.3.1.3 ÖKONOMISCHEN BEWERTUNG - 106 -

III.3.2 ERGEBNISSE UND DISKUSSION - 109 -

III.3.2.1 FRUCHTARTEN: AUSWAHL, ERTRÄGE UND SUBSTRATEIGENSCHAFTEN - 109 -
III.3.2.2 ANLAGENGRÖßEN UND MASSENFLUSS - 109 -
III.3.2.3 ÖKONOMISCHE BEWERTUNG - 110 -

III.3.3 AUSBLICK - 115 -

III.3.4 ZUSAMMENFASSUNG ÖKONOMISCHE GESAMTBETRACHTUNG - 115 -

III.4 LITERATURVERZEICHNIS - 116 -

III.5 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS - 120 -

III.6 ABBILDUNGSVERZEICHNIS - 122 -

III.7 TABELLENVERZEICHNIS - 122 -

IV. ÖKONOMIE DER THERMISCHEN VERWERTUNG - 124 -

IV.1 AUFGABENSTELLUNG - 124 -

IV.2 GRUNDLAGEN DER DYNAMISCHEN RECHNUNG - 125 -

IV.3 ERGEBNISSE FÜR DIE BTL-ANLAGE - 128 -

IV.4 WIRTSCHAFTLICHKEITSBERECHNUNG NACH DIN 2067 - 131 -

IV.5 ERGEBNISSE FÜR EIN PELLETHEIZKRAFTWERK - 133 -

IV.6 ZUSAMMENFASSUNG - 136 -

IV.7 VERWENDETE UNTERLAGEN - 136 -

IV.8 ABBILDUNGSVERZEICHNIS - 137 -

IV.9 TABELLENVERZEICHNIS - 137 -

V. ÖKOLOGISCHE AUSWERTUNG DER GESAMTKETTEN - 138 -

V.1 EINFÜHRUNG - 138 -

V.2 METHODIK UND VORGEHENSWEISE - 140 -

V.3 ANALYSIERTE BIOLOG-LEBENSWEGE - 144 -

V.3.1 LEBENSWEG 1: KRAFTSTOFFHERSTELLUNG (BTL-PFAD) - 144 -

V.3.2 LEBENSWEG 2: STROM- UND WÄRMEGEWINNUNG (KWK-PFAD) - 146 -

V.3.3 VARIANTEN UND OPTIMIERUNGSMÖGLICHKEITEN - 148 -

V.3.3.1 PELLETPRODUKTION: VARIANTEN UND OPTIMIERUNGSMÖGLICHKEITEN - 148 -
V.3.3.2 PELLETNUTZUNG: OPTIMIERUNGSMÖGLICHKEITEN - 150 -

V.4 ERGEBNISSE - 151 -

V.4.1 BIOLOG-BIOENERGIETRÄGER VERSUS FOSSILE ENERGIETRÄGER - 151 -

V.4.1.1 ERGEBNISSE DER ÜBERSICHTSÖKOBILANZEN: BEISPIEL TREIBHAUSEFFEKT - 151 -
V.4.1.2 BIOLOG-KRAFT- UND BRENNSTOFFE IM VERGLEICH: BTL VERSUS KWK - 153 -

V.4.2 SENSITIVITÄTS- UND VARIANTENANALYSEN - 155 -

V.4.2.1 VARIANTE: ELEKTROPORATION STATT SILIERUNG - 155 -
V.4.2.2 SENSITIVITÄTSANALYSE: GRÖßE DER DEZENTRALEN PELLETWERKE - 158 -

V.4.3 OPTIMIERUNGSPOTENZIALE BEI DER PELLETPRODUKTION - 160 -

V.4.3.1 WAHL DES ENERGIETRÄGERS FÜR DIE TROCKNUNG - 160 -
V.4.3.2 ZUKÜNFTIGE ENTWÄSSERUNGS- UND TROCKNUNGSTECHNOLOGIEN - 162 -

V.4.4 OPTIMIERUNGSPOTENZIALE BEI DER PELLETNUTZUNG - 164 -

V.4.5 ALLE OPTIMIERUNGSPOTENZIALE IM ÜBERBLICK - 166 -

V.4.6 BIOLOG-BIOENERGIETRÄGER VERSUS BIOGENE ENERGIETRÄGER - 168 -

V.5 ZUSAMMENFÜHRUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN - 171 -

V.6 LITERATUR UND ABKÜRZUNGEN - 175 -

V.7 ABKÜRZUNGEN - 177 -

V.8 ABBILDUNGSVERZEICHNIS - 178 -

V.9 TABELLENVERZEICHNIS - 179 -

V.10 ANHANG - 180 -

V.10.1 BTL-PFAD: ERGEBNISSE DER ÜBERSICHTSÖKOBILANZEN - 180 -

V.10.2 KWK-PFAD: ERGEBNISSE DER ÜBERSICHTSÖKOBILANZEN - 182 -

V.10.3 AUSGEWÄHLTE BASISDATEN FÜR VERSCHIEDENE BIOENERGIEPFADE - 184 -

***VI. UNTERSCHRIFT* - 185 -**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz unter dem Förderkennzeichen **220 031 905** gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

I. Projektkoordination

I.1 Aufgabenstellung

Das Vorhaben Biolog bildete ein Verbundvorhaben mit acht Partnern. Gefördert wurden sechs Teilprojekte mit eigenständigen Förderkennzeichen. Die ökologische und ökonomische Begleitforschung mit den Akteuren CUTEC, IFEU und TLL wurde unter einem Kennzeichen zusammengefaßt. Zur Sicherstellug der Kommunikation im weitesten Sinne diente ein Projektkoordinator. Zu seinen Aufgaben zählte im Einzelnen:

- Vertragsgestaltung des Verbundvorhabens
- Erstellung und Führung Projekthandbuch
- Führung des Gesamtterminplanes
- Organisation der Plenarsitzungen und Protokollerstellung
- Prüfung von projektspezifischen Veröffentlichungen auf Vertragsverletzung
- Klärung von Unklarheiten bei der Projektabwicklung an Schnittstellen.

Neben den insgesamt sechs Plenarsitzungen, welche im halbjährlichen Abstand an verschiedenen Orten durchgeführt wurden, fanden etliche Arbeitstreffen zu Detailfragen zwischen einzelnen Partern statt. Sie wurden von den Betroffenen organisiert. Die Koordination zweier Arbeitstreffen in größeren Kreis übernahm der Koordinator.

Neben den für den Ablauf des Gesamtvorhabens grundlegenden Aufgaben erstellte die Abteilung Öffentlichkeitsarbeit der CUTEC unmittelbar nach dem Projektstart ein Logo sowie eine Präsentationsvorlage, welche den Partnern zur unverbindlichen Verwendung zur Verfügung gestellt wurden. Ziel war die Schaffung einer gewissen Project Identity und eines geschlossenen Auftretens nach außen. Gegen Ende des Vorhabens richtete die Abteilung EDV eine Projekthomepage ein.

I.2 Vertragsgestaltung des Verbundvorhabens

Die Institutionen FZK, ATB, Fa. Vetter (Umbenennung im Projektverlauf zu Anhydro), FAL (Umbenennung im Projektverlauf zu vTI), Fa. AMANDUS KAHL und CUTEC stellten fachlich eigenständige Projektanträge (s. **Abb. I.2-1**), welche formal in die Teilvorhaben 1 bis 6 zusammengefaßt wurden. Das Teilvorhaben acht bildete ein unselbständiges Projekt, welches verwaltungstechnisch mit dem fachlichen Teil der CUTEC zusammengefaßt wurde. Die sechs genannten Partner gingen eine Kooperationsvereinbarung ein.

Im Teilvorhaben 7 wurden die Partner CUTEC, IFEU und TLL für die ökologische und ökonomische Begleitforschung unter dem Förderkennzeichen des Teilvorhabens 6 zusammengefaßt. Als Antragsteller fungierten die Clausthaler. Die beiden Partner wurden über einen F&E-Vertrag gemäß BMFT-Vordruck 0270b/09.05 in BioLog eingebunden.



TV1
Konditionierung grüner Biomasse durch elektroporationsunterstützte Entwässerung



TV2
Bereitstellung qualitätsgerechter Silage für die Herstellung von Biomasseformkörpern und Kenngrößenermittlung



TV3
Entwässerung und Hochtemperaturtrocknung aufbereiteter Produkte aus dem Energiepflanzenanbau



TV4
Untersuchung der Vergärungseigenschaften von Silagepresssäften



TV5
Trocknung und Pelletierung der entwässerten Silage



TV6
Energetische Nutzung aufbereiteter Produkte aus dem Energiepflanzenanbau

TV7
Ökonomie der thermischen Verwertung

TV8
Projektkoordination



TV7
Ökonomische Begleitforschung von der Silage bis zum Pellet



TV7
Ökologische Auswertung der Gesamtketten

Abb. I.2-1: Teilvorhaben des Verbundvorhabens BioLog nach fachlicher Sortierung

I.3 Projektorganisation

Als Grundlage zur Sicherstellung der Kommunikation erstellte der Koordinator zum Vorhabensstart ein Projekthandbuch. Es enthielt eine Adressenaufleistung von Ansprechpersonen jeder Institution (s. **Abb. I.3-1**). Angestrebt wurde, jeweils den Projektleiter, einen Vertreter sowie eine Ansprechperson für administrative Fragen aufzuführen.

BioLog - Entwicklung, Erprobung und Demonstration neuer Logistikkonzepte für Biobrennstoffe **Revision:** 9 **Datum:** 17.12.2007 **Seite:** 4

Titel	Name	Vorname	Institution	Funktion	Straße	PLZ + Ort	Tel.-Nr.	eMail
Dr.-Ing.	Sternowsky	Stephan	AMANDUS KAHL GmbH & Co. KG	Projektleiter (T5)	Dieselstraße 5-9	21465 Reinbek bei Hamburg	040-72771-338	sternowsky@amandus-kahl-group.de
Dipl.-Ing.	Wache	Sebastian	KAHL	Vertreter	Dieselstraße 5-9	21465 Reinbek bei Hamburg	040-72771-255	wache@amandus-kahl-group.de
Dipl.-Kfm.	Krabbe	Wolfram	KAHL	Verantwortlicher für administrative Fragen	Dieselstraße 5-9	21465 Reinbek bei Hamburg	040-72771-387	krabbe@amandus-kahl-group.de
Prof. Dr.-Ing.	Fürll	Christian	Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB)	Projektleiter (T2) Vertreter in T7 f. ATB	Max-Eyth-Allee 100	14469 Potsdam	0331-5699-310	cfuerll@atb-potsdam.de
Dr.-Ing.	Scholz	Volkhard	ATB	Projektleiter (T7 ATB) Vertreter in T 2	Max-Eyth-Allee 100	14469 Potsdam	0331-5699-312	vscholz@atb-potsdam.de
Dr.	Schemel	Hartmut	ATB	Projektmitarbeiter T2, T7	Max-Eyth-Allee 100	14469 Potsdam	0331-5699-924	hschemel@atb-potsdam.de
Dipl.-Ing.	Daries	Werner	ATB	Projektmitarbeiter T2, T7	Max-Eyth-Allee 100	14469 Potsdam	0331-5699-923	wdaries@atb-potsdam.de
Dr.rer.nat.	Idler	Christine	ATB	Projektmitarbeiterin Analytik	Max-Eyth-Allee 100	14469 Potsdam	0331-5699-124	cidler@atb-potsdam.de
Dr.	Habelt	Ralf	ATB	Verantwortlicher für administrative Fragen	Max-Eyth-Allee 100	14469 Potsdam	0331-5699-710	rhabelt@atb-potsdam.de
Dr.-Ing.	Vodegel	Stefan	Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH (CUTEC)	Projektleiter (T6, T7 CUTEC, T8)	Leibnizstr. 21+23	38678 Clausthal-Zellerfeld	05323-933-122	stefan.vodegel@cutec.de
Dipl.-Ing.	Immisch	Christoph	CUTEC	Vertreter	Leibnizstr. 21+23	38678 Clausthal-Zellerfeld	05323-933-209	christoph.immisch@cutec.de

Abb. I.3-1: Auszug aus der Adressliste des Projekthandbuches

Ferner legte das Handbuch Standards wie Protokollführung, zulässige Software, Umgang mit Projektdokumentationen, Berichtspflichten u.ä. fest. Im Falle von Änderungen wurde die Datei überarbeitet und die Revision an die Partner auf elektronischem Wege verteilt.

Die Antragstellung der Partner beinhaltete indivuelle Arbeits- und Terminpläne der Einzelvorhaben. Aufgabe des Koordinators war es, aus den Vorgaben einen Gesamtterminplan zu erstellen, welcher zur Abstimmung der Einzelvorgaben herangezogen werden kann. Der Terminplan war kontinuierlich zu pflegen.

Zur gegenseitigen Information und Abstimmung des weiteren Vorgehens wesentlicher Arbeitsschritte fanden im halbjährlichen Abstand Plenarsitzungen statt. Ort und Gastgeber wechselten. Insgesamt kam es zu sechs Plenarsitzungen (26.09.2009: Kassel/Fa. Anhydro, 13.03.2007: Reinbek/Fa. AMANDUS KAHL, 11.09.2007: Potsdam/ATB, 14+15.02.2008: Heidelberg/IFEU, 10.06.2008: Jena/TLL, 6.11.2008: Braunschweig/vTI). Die Organisation der Treffen fand in Abstimmung des Koordinators mit dem jeweiligen Gastgeber statt. Die Protokollführung oblag der CUTEC.

In dringenden Fällen der Abstimmung anstehender Arbeiten wurden Treffen in größerer Runde einberufen. Dies war zweimal notwendig (22.08.2006: Clausthal/CUTEC, 10.12.2007: Potsdam/ ATB).

Am Trockenwerk in Selbelang fanden drei Großversuche statt (November 2006, Oktober 2007, April 2008). Die Planung führten die hauptbetroffenen Institutionen ATB, Fa. Anhydro und Fa. AMANDUS KAHL durch. Der Koordinator regelte nur Unstimmigkeiten an Schnittstellen wie Transportzuständigkeiten. Ferner sorgte er für die photograhische Dokumentation.

Die KLEA-Großversuche in Neu-Eichenberg im Juni 2008 organisierten maßgeblich das FZK und die Fa. Anhydro.

Im Verlauf von BioLog entstanden verschiedene Veröffentlichungen bei den Partnern. Schriftliche Fassungen wurden vorab bei der CUTEC zur Prüfung auf Vertragskonformität eingereicht. Es gab keinen Fall von Beanstandungen.

I.4 Öffentlichkeitsarbeit

Um das Verbundvorhaben mit einer Project Identity zu versehen, wurden ein Logo sowie eine einheitliche Power-Point-Musterpräsentation kreiert.

Das Logo (s. Kopfzeile) faßt den Namen des Vorhabens, das Motto, eine versinnbildlichte Halmpflanze sowie ein Auto als Synonym für BtL zusammen. Dem Betrachter soll somit eine schnelle ganzheitliche Betrachtung der Projektcharakteristika vermittelt werden.

Die Musterpräsentation stellt auf der Startseite eines der BioLog-Ausgangsmaterialien, nämlich Mais als Hauptmotiv dar. Vorgestellt werden alle Partner sowie die Förderinstitution durch ihre Logos (s. **Abb. I.4-1**).



Abb. I.4-1: Startseite der BioLog-Musterpräsentation in der Masteransicht.

Logo und Musterpräsentation wurden allen Partnern elektronisch zur Verfügung gestellt. Die Verwendung war freiwillig.

Im Jahr 2008 startete der Projektkoordinator die Arbeiten für die Projekthomepage. Sie stellt Aufgabenstellung, Anlagentechnik und Ergebnisse jeden Teilvorhabens dar. Ziel ist es, das Vorhaben der interessierten Öffentlichkeit in Kurzform zugänglich zu machen (s. **Abb. I.4-2**).

Nach Eingang aller Zuarbeiten der Partner ist die Homepage unter der Adresse www.cutec.de/biolog.de einsehbar.



Abb. I.4-2: Startseite der BioLog-Homepage

Im Projektablauf wurde die Bewilligung zumindest in Teilbereichen ähnlicher Vorhaben von anderen Fördermittelgebern bekannt. Der Koordinator sorgte für die Kontaktaufnahme und Weiterleitung der erhaltenen Informationen innerhalb des Verbundes.

I.6 Abkürzungsverzeichnis

ATB	Leibniz-Institut für **A**grar**t**echnik Potsdam-**B**ornim e.V.
BMELV	**B**undes**m**inisterium für **E**rnährung, **L**andwirtschaft und **V**erbraucherschutz
BMFT	**B**undes**m**inisterium für **F**orschung und Technologie
BtL	**B**iomass **t**o **L**iquid
CUTEC	**C**lausthaler **U**mwelt**tec**hnik-Institut GmbH
FAL	Bundes**f**orschungs**a**nstalt für **L**andwirtschaft
F&E	**F**orschung & **E**ntwicklung
FNR	**F**achagentur **N**achwachsende **R**ohstoffe
IFEU	**I**nstitut **f**ür **E**nergie- und **U**mweltforschung Heidelberg GmbH
TLL	**T**hüringer **L**andesanstalt für **L**andwirtschaft
vTI	Johann Heinrich **v**on **T**hünen-**I**nstitut

I.7 Abbildungsverzeichnis

Abb. I.2-1	Teilvorhaben des Verbundvorhabens BioLog	S. 07
Abb. I.3-1	Auszug aus der Adressliste des Projekthandbuches	S. 08
Abb. I.4-1	Startseite der BioLog-Musterpräsentation in der Masteransicht	S. 09
Abb. I.4-2	Startseite der BioLog-Homepage	S. 10

II. Energetische Nutzung von Energiepflanzenpellets

II.1 Aufgabenstellung

Aufgabe des Teilvorhabens war es, die von den Verbundpartnern hergestellten Pellets auf ihre brennstofftechnische Anwendbarkeit experimentell in Technikumsanlagen zu prüfen. Dazu standen im ersten Schritt brennstofftechnische Analysen im Labor der CUTEC an. Hier wurden Größen wie Heizwert, Asche- und Wassergehalt, Hauptelemente wie Kohlenstoff-, Wasserstoff- und Sauerstoffgehalt bestimmt ebenso wie Nebenelemente (z.B. Alkali) und das Asche-erweichungsverhalten.

Die thermische Umsetzung der Pellets erfolgte mittels Vergasung und Verbrennung. Ziel der Vergasung war es, die im Brennstoff gespeicherte Energie in ein Synthesegas zu überführen, welches auf vielfältige Art genutzt werden kann. Im einfachsten Fall ist die Verbrennung im Gasmotor zur Strom- und Wärmeerzeugung nach einer geeigneten Gasreinigung denkbar. Die Anlagen hätten dezentralen Charakter. Möglich wäre auch die Einbringung in eine Synthese z.B. zur BtL-, SNG- oder LPG-Erzeugung, wenn die Katalysatoren durch eine anspruchsvolle Gasreinigung und –aufbereitung geschützt werden. Diese Anlagen hätten zentralen Charakter. Um beide Fälle abzudecken, war das Synthesegas auf seine chemische Zusammensetzung und den Heizwert zu analysieren. Durch die Verfahrensführung sollte versucht werden, ein H_2:CO-Verhältnis von mindestens 2:1 einzustellen, wie es für die BtL-Synthese notwendig ist.

Bei der Verbrennung war die Energie der Pellets in fühlbare Wärme umzusetzen. Diese wird in kommerziellen Anlagen mittels der traditionellen Technologie des Wasser-/Dampfkreislaufs mit Turbinensatz als Strom und Heizenergie nutzbar gemacht. Im Vorhaben war auch zu betrachten, ob die Nutzung in Hausfeuerungen zur reinen Wärmenutzung in Frage käme. Neben dem emissionsrechtlichen Hintergrund der Versuche, der durch eine ausgeprägte Analytik des Abgases betrachtet wurde, stand das Ascheerweichungsverhalten der Pellets im Vordergrund: Kommt es tatsächlich zu Versinterungen und Verbackungen innerhalb des Feuerraums und an den Wärmetauschern, wie es in anderen Quellen für Halmgut berichtet wird [1]. Führt ggf. die Vorbehandlung besonders beim Schritt des Auspressens zu einer Anhebung der Ascheerweichungstemperatur?

Die Vergasung wurde in einem Temperaturbereich unterhalb des Erweichungspunktes der Aschen durchgeführt. Damit besteht die Chance, das im Heißgasfilter aus dem Gasstrom abgetrennte Material als Rohdünger in den Stoffkreislauf zurückführen zu können. Um diese These zu prüfen, wurden a) Untersuchungen am REM mit angeschlossener EDX durchgeführt und b) Materialproben an das TLL geliefert, um dort in Gefäßversuchen auf die Pflanzen-verträglichkeit geprüft zu werden.

Die ArtFuel-Vergasungsanlage der CUTEC arbeitet bei Normaldruck. Für alle o.g. Synthesen ist Druck erforderlich. Die im Vorhaben exemplarisch zu betrachtende Fischer Tropsch-Synthese zur BtL-Herstellung erfordert ein Niveau von 25 bis 30 bar. Um den elektrischen Energiebedarf des Kompressors des Synthesegases zu sparen, ist es attraktiv bereits die Vergasung unter Druck ablaufen zu lassen. Entsprechende Vorhaben, thermodynamische Gesichtspunkte und Schwierigkeiten waren in einem theoretischen Paket des Teilvorhabens 6 aufzustellen.

II.2 Brennstoffanalysen

Die angelieferten Pellets entstammten Technikumsversuchen des Partner AMANDUS KAHL, sowie v.a. Großversuchen aus dem Trockenwerk in Selbelang. Sie waren auf brennstofftechnische Kennwerte zu untersuchen. Biochemische Charakteristika wie Lignin-, Eiweiß-, Stärkegehalt o.ä. spielten keine Rolle, da diese Verbindungen bei der Vergasung und Verbrennung schnell in die Grundbausteine zerlegt werden. Analysen fanden nach jeder der drei Herstellungswochen in Selbelang sowie nach einer Versuchsreihe im Technikum von AMANDUS KAHL statt. In **Tab. II.2-1** sind Auszüge aus den Ergebnissen dargestellt.

Tab. II.2-1: Charakteristische Brennstoffwerte (Auszug)

		Gras[2]	Mais[3]	Roggen[4]	Roggen[5]	Gerste[6]
Wassergehalt	[Gew.-%]	6,8	10,2	7,1	4,2	7,5
Asche 815 ℃	"	6,1	3,6	5,5	7,2	6,8
Flüchtige Bestandteile	"	67,2	71,9	70,1	71,0	68,3
Kohlenstoff	"	44,90	41,10	43,20	43,1	41,50
Wasserstoff	"	5,30	6,90	5,70	5,70	6,20
Sauerstoff[1]	"	34,70	37,20	37,10	37,10	36,00
Stickstoff	"	1,19	0,89	1,20	2,18	1,50
Schwefel	"	0,18	0,07	0,15	0,13	0,16
Chlor	"	0,83	0,05	0,11	0,41	0,44
Heizwert H_u	[MJ/kg]	16,4	15,6	16,5	16,3	16,0
Calcium	[mg/g]	5,2	2,3	3,1	3,2	5,1
Kalium	"	10,5	6,4	10,7	15,2	19,9
Magnesium	"	1,9	1,1	1,3	0,9	1,4
Natrium	"	3,0	0,1	0,3	0,1	0,8
Phosphor	"	1,8	2,2	2,3	2,6	2,8

Kurzanalyse | Elementaranalyse | Brennstoffkennwert | Spurenanalyse

[1]: Berechnet aus Massenbilanz

[2]: Analyse vom Dezember 2006, Probe der Selbelang I - Aufbereitungswoche

[3]: Analyse aus Mai/Juni 2008, Pellets der Selbelang III - Aufbereitungswoche

[4]: Analyse aus Dezember 2006, Pellets der Selbelang I - Aufbereitungswoche

[5]: Analyse aus Okt/Nov. 2007, Roggen GPS, lose vor der Pelletierung der Selbelang II - Aufbereitungswoche

[6]: Analyse vom Dezember 2006, Pellets der Selbelang I - Aufbereitungswoche

Bem.: *Alle Angaben beziehen sich auf den Annahmezustand incl. Wasser und Asche*

Erkennbar ist, dass die Materialeigenschaften sehr ähnlich sind. Auch durch den Einsatz einer neuen Presse, wie am Vergleich der beiden Roggenproben deutlich wird, lässt sich keine signifikante Absenkung von Werten der Spurenanalyse erkennen. Der niedrige Wassergehalt der losen Halme vor der Pelletierung resultiert aus dem Umstand, dass vor der Verdichtung Wasser zugesetzt wird.

Für die thermische Nutzung ist das Ascheerweichungsverhalten von hoher Bedeutung. Analysen wurden gemäß der etablierten DIN 51730 durchgeführt (s. **Tab. II.2-2**).

Tab. II.2-2: Ascheverhalten gemäß DIN 51730 mit einer Veraschung bei 815 ℃

		Gras[1]	**Mais[2]**	**Roggen[3]**	**Gerste[4]**
Erweichungstemperatur	[℃]	1.062	997-1.000	1.030	1.015
Halbkugeltemperatur	“	1.148	1.130	1.166	1.111
Fließtemperatur	“	1.179	1.223	1.240	1.198

[1]: Analyse vom Dezember 2006, Probe der Selbelang I - Aufbereitungswoche

[2]: Analyse vom Mai/Juni 2008, Pellets der Selbelang III - Aufbereitungswoche

[3]: Analyse vom Dezember 2006, Pellets der Selbelang I - Aufbereitungswoche

[4]: Analyse vom Dezember 2006, Pellets der Selbelang I - Aufbereitungswoche

Eine erste Reaktion, nämlich die Erweichung, findet bei allen Materialien erst ab ca 1.000 ℃ statt, also in einem für die Vergasung unkritischen Bereich. Zu beachten ist, dass die Norm für traditionelle Festbrennstoffe wie Kohlen, Abfall oder Holz etabliert ist. Um die Austreibung des CO_2 aus den Carbonaten für feste Biomasse-Brennstoffe zu vermeiden, findet nach der EU-Norm CEN TC 335/WG4 N43 eine Veraschung bei 550 ℃ und mit einer fixen Aufheizrate von 5 ℃ statt [2]. Besonderes Kennzeichen der niedrige n Temperatur ist, dass ein eventueller früher Sinterbeginn erkannt werden kann. Die Ergebnisse zeigen das erwartungsgemäße Verhalten, dass sich die Summe an Natrium- und Kaliumverbindungen signifikant auf das thermische Verhalten auswirkt (s. **Tab. II.2-3**). (**Bem.:** Da am Institut keine Einrichtung für die

exakte Befolgung der EU-Norm vorhanden ist, erfolgte eine maximale Anlehnung an die Norm bei einigen Stichproben.)

Tab. II.2-3: Ascheverhalten unter thermischer Last bei niedriger Veraschungstemperatur*****

		Gras[1]	**Roggen[2]**	**Gerste[3]**
Atmosphäre		oxidierend	oxidierend	oxidierend
Sinterbeginn	[℃]	810	873	720
Erweichungstemperatur	“	930	921	800
Halbkugeltemperatur	“	1.159	1.133-1.160**	1.022
Fließtemperatur	“	1.198	1.219	1.160

*: Asche verascht bei 550 ℃ nach CEN TC 335/WG4 N4 3, Herstellung, Präparation und Auswertung nach DIN 51730 (Ausnahme: Bestimmung des Sinterpunktes)

**: Experimentell schwer erkennbar

∑ (K, Na) [mg/g]: [1]: 13,5, [2]: 11,0, [3]: 20,7

Der Sinterbeginn unterscheidet sich trotz der geringen Unterschiede beim Alkaligehalt bei den drei Stichproben um bis zu 153 ℃. Es soll aber an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die Analyse beim ruhenden Brennstoff durchgeführt wird. In einem Bewegtbett, wie es die zirkulierende Wirbelschicht besitzt, ist die Halsbildung zwischen den Partikeln als Beginn des ersten Sinterstadiums erschwert. Die Analysewerte geben daher eine Warnung und einen Hinweis auf die ratsame Reaktortemperatur, aber keine Vorschrift auf den zulässigen Wert.

II.3 Anlagenbeschreibung

II.3.1 Anlage zur Synthesegaserzeugung

Für die Vergasung der Brennstoffpellets kam eine **z**irkulierende **W**irbel**s**chicht (Abk.: ZWS) zum Einsatz. Die Anlage konnte ihre Eignung für verschiedene Biomassen bereits zeigen [z.B. 3,4]. Sie arbeitet bei Normaldruck nach dem autothermen Prinzip, wozu sie Dampf als Fluidisierungsmittel und Sauerstoff für die internen exothermen Reaktionen benötigt (s. **Abb. II.3.1-1**).

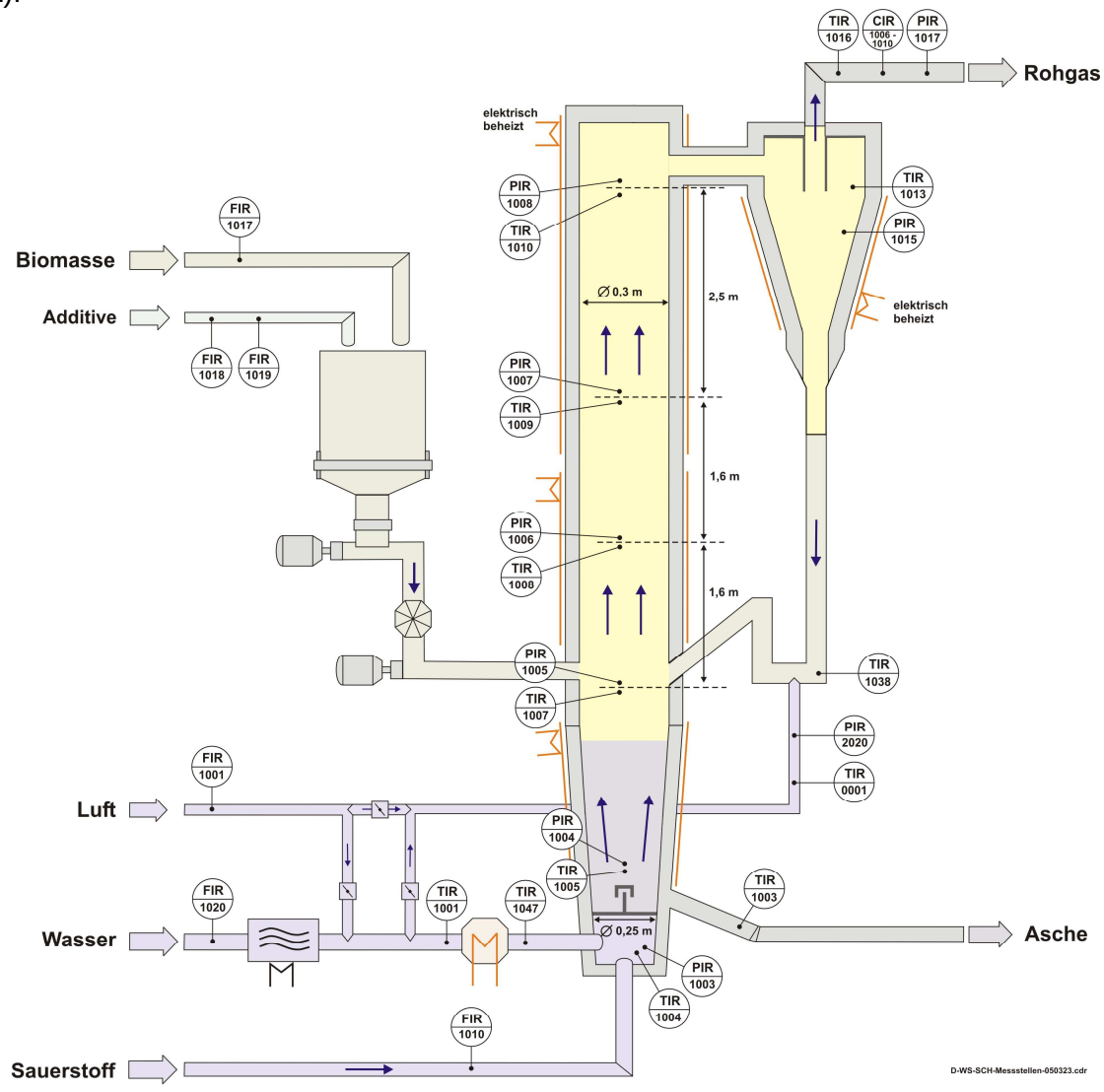


Abb. II.3.1-1: Apparatefließbild des ArtFuel-Vergasers

Der Vergaser besitzt eine thermische Maximalleistung von 0,4 MW. Zur Heraufsetzung des Ascheschmelzpunktes beim Einsatz von Halmgut wird Branntkalk als Additiv hinzugegeben.

Da die Strecke der Synthesegasreinigung nur eine Inputkapazität von 60 Nm^3/h besitzt, muss der Großteil des Gases in einer Nachbrennkammer verbrannt werden. Das zu verwertende Gas

passiert im ersten Reinigungsschritt einen Heißgasfilter. Hier findet die Entstaubung bei einer Betriebstemperatur von 500 bis 600 ℃ statt. Die As che wird bei Überschreitung eines gewissen Differenzdruckes nach dem Impuls-Jet-Verfahren durch Stickstoff abgeblasen, ausgetragen und gesammelt. Die Reinigungsstufe stellt die Senke für die Erdalkali, Alkali und das Phosphor dar, welche mit der Biomasse und als Additiv in den Vergaser gelangen.

II.3.2 Umsetzung in fühlbare Wärme

Für die Verbrennung wurde ein Rückschubrost nach dem System MARTIN® eingesetzt. Er besitzt eine Feuerungswärmeleistung von 0,9 MW. Die Technikumsanlage in Clausthal ist mit einer umfangreichen Apparatetechnik zur Variation verfahrenstechnischer Parameter und einer umfangreichen Analytik ausgestattet (s. **Abb. II.3.2-1**).

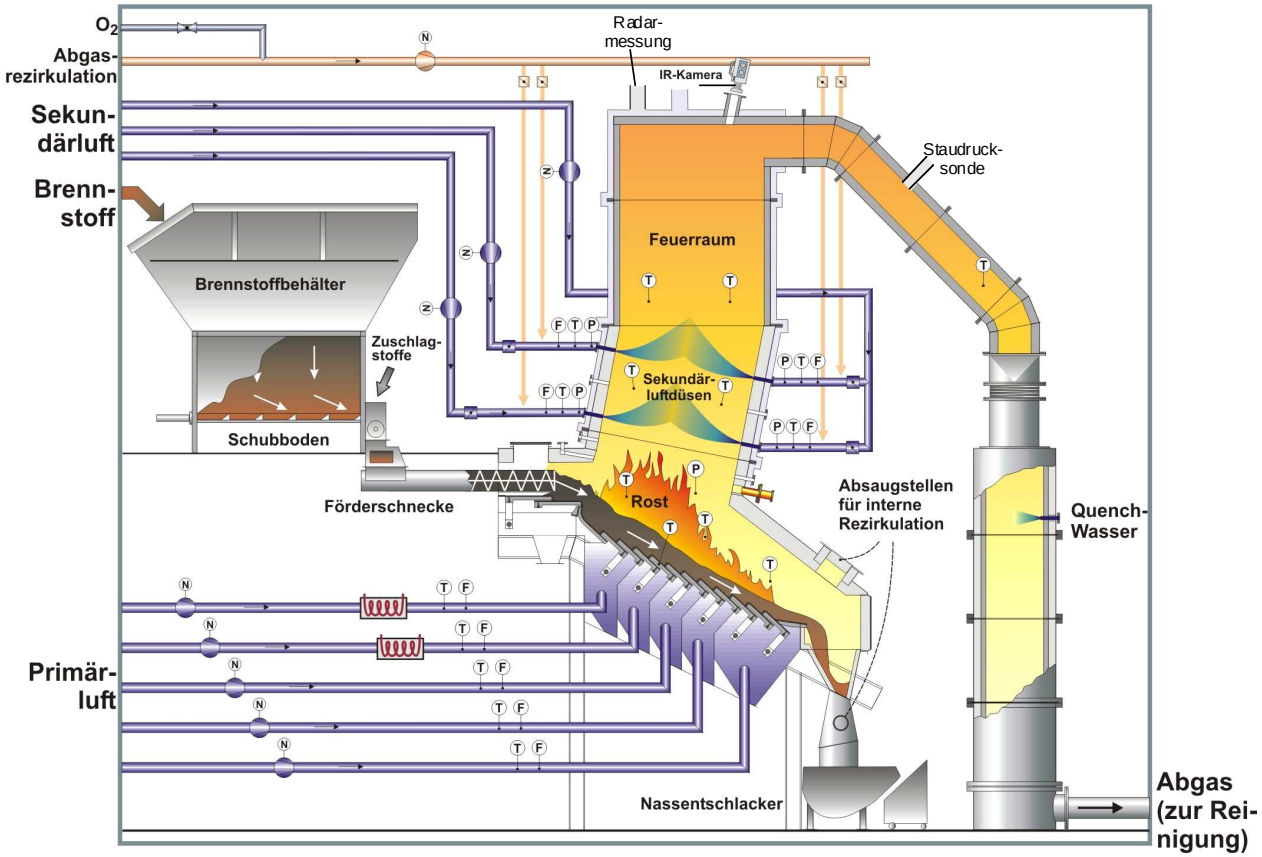


Abb. II.3.2-1: Technikumsanlage Rückschubrost der CUTEC

Für die Abkühlung des Abgases sorgt ein luftgekühlter Wärmetauscher. Druckführende Teile sind aus Sicherheitsgründen nicht existent. Die Rostasche fällt in ein Wasserbad und wird mechanisch ausgetragen und gesammelt. Die Abreinigung des Gases von sauren Bestandteilen und Schwermetallen erfolgt mittels Eindüsung von Adsorbens. Die Feinasche wird in einem Gewebefilter abgetrennt.

II.4 Versuchsdurchführung

II.4.1 Zirkulierende Wirbelschicht

II.4.1.1 Versuche mit den Pellets der Selbelang-Versuche

a) Pellets der Selbelang I-Woche

Vom 20 bis 24.11.2006 erfolgte im Trockenwerk in Selbelang die Herstellung der ersten Charge an Pellets (s. Teilvorhaben 2, 3, 5). Die thermische Behandlung musste in zwei voneinander unabhängigen Versuchswochen durchgeführt werden, da es in der ersten Woche zu Betriebsstörungen mit den Graspellets kam. Zum Einsatz kamen insgesamt Mais, Gersten-, Roggen- und Graspellets. Ziele der Versuche waren:

1. Nachweis der technischen Machbarkeit im Dauerbetrieb von ca. 100 h pro Versuchswoche

2. Das H_2:CO-Verhältnis möglichst auf das Niveau der für die BtL-Herstellung benötigen Werte einzustellen (eisenbasierter Katalysator in der FTS≈1,75, cobaltbasierter Katalysator ≈2,1)

3. Datensammlung hinsichtlich thermischer Effektivität, Aschecharakteristika, Gaszusammensetzung und notwendigen Verfahrensparametern für stabilen Betrieb.

4. Produktion von Filterasche für Gefäßversuche des Partners TLL.

Bei allen Versuchseinstellungen wurde eine Teerprobenahme im Rohgas durchgeführt. Beim Gersten-Versuch kam eine Teerprobenahme im Reingas hinzu. Darüber hinaus liegen Analysewerte der Spurenkomponenten NH_3, H_2S und HCl vor. Die Bilanzierung basiert auf externen Gasanalysen (Fa. K-UTEC, Sondershausen). Bei den Versuchen mit Mais, Gerste und Roggen wurden Bett- und Filteraschеproben genommen und im CUTEC-Labor analysiert (Aufschluss- und Eluatuntersuchungen). Außerdem wurden REM/EDX-Analysen am Institut für Metallurgie der TU Clausthal durchgeführt. Aus dem Vergasungsversuch mit Graspellets liegen keine Bett- und Filteraschen vor, da der Bettascheaustrag und die Rohrleitung zum Heißgasfilter verstopft waren.

Die Versuche wurden bei Temperaturen von etwa 820 °C und einer Luftzahl von ca. 0,28 mit Dampf und Sauerstoff als Vergasungsmittel (Dampf-Sauerstoff-Verhältnis≈2,2) durchgeführt. Um eine Ascheerweichung zu verhindern wurde das Dampf-Sauerstoff-Verhältnis bei der Vergasung von Graspellets auf 2,59 erhöht. Die Verweilzeit des Gases in der ZWS lag bei allen Versuchen bei etwa 3,5 s. Als Bettmaterial wurde Branntkalk (CaO) verwendet. Außerdem wurde während der Versuche kontinuierlich CaO zudosiert.

b) Pellets der Selbelang II-Woche

Vom 22. bis 25.10.2007 wurden im Trockenwerk in Selbelang verschiedene Silagen verarbeitet (s. Teilvorhaben 2, 3, 5). Nachdem eine erste Versuchswoche zur Vergasung Ende 2007 wegen apparatetechnischer Schwierigkeiten abgebrochen werden mußte, erfolgte ein Neuansatz vom 19. bis 23.05.2008.

Ziel des Versuches war es die Machbarkeit und die Synthesegaszusammensetzung bei der Vergasung folgender Biomassepellets zu untersuchen:

- GPS Roggenpellets

- Grünroggensilagepellets
- Maissilagepellets
- Grassilagepellets (Häcksellängen 10 mm und 20 mm).

Die Verfahrensparameter blieben möglichst konstant. Während der gesamten Versuchslaufzeit wurde Branntkalk zudosiert.

Bei allen Versuchseinstellungen erfolgten Teerprobenahmen im Rohgas und im Reingas. Es liegen Analysenwerte der Spurenkomponenten NH_3, H_2S, HCN und HCl sowie vom Wassergehalt der Rohgase vor. Für alle Versucheinstellungen analysierte die Fa. K-UTEC Gasproben. Bei den Versuchen wurden Bett-, Siphon- und Filteraschеproben genommen und im CUTEC-Labor auf den Kohlenstoffgehalt untersucht.

Das Temperaturniveau betrug etwa 770 bis 788 °C, die Luftzahl lag bei ca. 0,22 bis 0,29 und Dampf und Sauerstoff dienten als Vergasungsmittel (Dampf-Sauerstoff-Verhältnis [kg/kg]: 1,86 bis 2,02).

Die Verweilzeiten des Gases in der ZWS lagen bei den Versuchen zwischen 3,7 und 4,8 s. Als Bettmaterial kam Sand zum Einsatz. Außerdem wurde während der Versuche kontinuierlich Branntkalk (CaO) zudosiert. Die teilweise sehr hohen Stickstoffgehalte im Gas resultieren aus den Stickstoff-Spülströmen.

II.4.1.2 Ergänzungsversuche mit Holz

Wie die Brennstoffanalysen und erste Versuche zeigten, ist eine Vergasungstemperatur über ca. 820 °C schwierig im Dauerbetrieb zu fahren. Um aber Erkenntnisse über Zusammenhänge zwischen verfahrenstechnischen Parametern über einen Temperaturbereich von 700 bis 900 °C zu gewinnen, fanden Ergänzungsversuche mit Holzpellets am Projektende statt.

Folgende Versuchsparameter waren zu variieren:

- Vergasungstemperatur
- Dampf / O_2 –Mengen und -Verhältnisse
- Leistung Begleitheizung
- Additive.

Für alle Versuchseinstellungen wurden Teerproben gezogen sowie Ascheproben zur Ermittlung der Kohlenstoffgehalte (Filterasche, Siphonasche, Bettasche). Gasproben wurden extern analysiert. Analysen der Spurenkomponenten NH_3, H_2S, HCN und HCl erfolgten nicht, da bereits eine Vielzahl an Analysenwerten für den Einsatzstoff Mischholzpellets existiert. Folgende Mittelwerte aus unterschiedlichen Versuchswochen fanden Verwendung:

H_2S (PG,tr):	0,024 [g/m^3_N]
HCl (PG,tr):	0,0018 [g/m^3_N]
HCN (PG,tr):	0 [g/m^3_N]
NH_3 (PG,tr):	0,352 [g/m^3_N]

Die Versuche wurden bei Temperaturen von etwa 710 bis 900 ℃ und einem Lambda von ca. 0,14 bis 0,32 mit Dampf und Sauerstoff als Vergasungsmittel (Dampf-Sauerstoff-Verhältnis [kg/kg]: 1,63 bis 3,46) durchgeführt.

Die Verweilzeiten des Gases in der ZWS lagen bei den Versuchen zwischen 3,0 und 5,8 s. Die Verweilzeit wird bestimmt über den gemessenen Betriebsvolumenstrom des Rohgases und das Gesamtvolumen der Wirbelschicht. Als Bettmaterial wurde Sand verwendet. Außerdem wurde während der Versuche kontinuierlich Branntkalk (CaO) zudosiert, die Ausnahmen bilden hier die Punkte 0833-1 und 0833-2.

Die teilweise sehr hohen Stickstoffgehalte im Gas resultieren aus Stickstoff-Spülströmen.

II.4.2 Rückschubrost

Vom 14.04.-18.04.2008 wurde eine Versuchswoche zur Verbrennung von Pellets aus Maissilagen der Selbelang III-Präparation durchgeführt.

Ziel des Versuches war es die generelle Machbarkeit sowie den Einfluss unterschiedlich vorbereiteter Maissilagen (Häckselläge, Pelletgröße) auf den Anlagenbetrieb und Emissionen zu untersuchen.

Aufgrund vier unterschiedlicher Aufbereitungen der Biomasse, bestehend aus zwei Häckselläge (4 und 17 mm) und zwei Pelletgrößen (8 und 15 mm) ergaben sich vier Versuchspunkte. Anschließend wurden bei einer weiteren Versuchseinstellung verfahrenstechnische Parameter wie Primär- und Sekundärluft verändert (s. **Tab. II.4.2-1**).

Tab. II.4.2-1: Parameter der Versuchsdurchführung

Versuch	Häcksel-länge [mm]	Pellet-durchmesser [mm]	Luftzahl Primärluft	Luftzahl Sekundärluft	Primärluft ges [kg/h]	Sekundärluft ges [kg/h]	Rezi [kg/h]
0816-1	4	15	0,8	0,8	540	540	200
0816-2	17	15	0,8	0,8	540	540	250
0816-3	4	8	0,8	0,8	540	540	350
0816-4	17	8	0,8	0,8	540	540	350
0816-5	17	8	1,2	0,4	810	265	350

Zu Beginn des Versuches wurde kontinuierlich Kalkstein ($CaCO_3$) zur Biomasse zudosiert. Nach einer gewissen Versuchslaufzeit wurden die HCl- und SO_2-Werte im Abgas über eine Zudosierung von Kalkhydrat ($Ca(OH)_2$) auf den Grenzwert eingestellt.

Der Rückschubrost wurde zunächst mit Holzpellets angefahren, um einen stabilen Anfangsbetrieb zu gewährleisten. Erst nach einer Betriebzeit von ca. 12 h erfolgte die Umstellung auf Maissilagepellets. Zu Beginn des Versuches wurden für ca. 10 h kontinuierlich etwa 20 kg/h Kalkstein zum Brennstoff zudosiert. Dieser Kalk bildete auf dem Rost eine Art Schutzschicht, die eine zu starke Erwärmung der Roststäbe verhinderte. Anschließend wurde die Förderung für weitere acht Stunden auf ca. 10 kg/h reduziert. Nach den ersten sieben Stunden der Kalkzugabe wechselte das Brennmaterial von Holz auf Maissilagepellets. Die weitere Kalkzugabe diente der Erhöhung des Ascheschmelzpunktes der Biomasse, um Verschlackungen auf dem Rost durch Überschreiten der kritischen Temperaturen zu vermeiden (s. **Abb. II.5.2.3-1**).

II.5 Versuchsergebnisse

II.5.1 Vergasung

II.5.1.1 Betriebserfahrungen

Die Zuführung der Biomassepellets in die Zirkulierende Wirbelschicht bereitet keine Schwierigkeiten, obwohl einige Biomassen aufgrund ihrer schlechten Pelletiereigenschaften in einem Zustand mit hoher Zerfallneigung (Grassilage, große Pellets) angeliefert wurden.

Der erste Versuchsbetrieb mit Maissilagepellets verlief ohne Schwierigkeiten. Die Gersten- und Roggenpellets zeigten Agglomerationserscheinungen im Bettmaterial (gröbere Aschepartikel) und benötigen daher mehr Wasserdampf um eine ausreichende Fluidisation des Bettes zu gewährleisten. Die Vergasung der Grassilagepellets war nicht möglich, da es vermutlich aufgrund von Ascheerweichung, begünstigt durch Wechselwirkungen mit Aschen aus den vorhergehenden Versuchstagen, zu einer Versinterung des Bettmaterials kam. Dies führt zu einem Zusammenbruch des Wirbelbetts (s. **Abb. II.5.1.1-1**).



Abb. II.5.1.1-1: Agglomeriertes Bettmaterial nach Überschreiten des Ascheerweichungspunktes und verbackenes Bettmaterial im unteren Teil der Wirbelschicht, direkt über dem Düsenboden

In der zweiten Versuchswoche mit Maissilagepellets, Gerstenganzpflanzensilagepellets, Roggenganzpflanzensilagepellets und Grassilagepellets konnte die Machbarkeit der Vergasung von Graspellets gezeigt werden.

Die dritte Versuchswoche musste bereits nach einem Tag während des Betriebs mit GPS-Roggenpellets abgebrochen werden, da sich wiederum, vermutlich aufgrund zu hoher Temperaturen während des Anfahrbetriebes, die Wirbelschicht zusetzte. Zwei weitere Ansätze diese Versuche durchzuführen, mussten ebenfalls an den ersten Tagen abgefahren werden, da aufgrund von Langzeitbelastungen der Anlage Beschädigungen auftraten. Beim ersten Ansatz kam es zu Durchflussproblemen im Bereich der Rohgasleitung. Der Hauptteil des Synthesegases wird ohne weitere Aufreinigung, also ohne Staubabtrennung, direkt der

Nachbrennkammer zugeführt. Aufgrund des relativ hohen Aschegehaltes von Biomassen, der sich bei einer Vergasung in der Wirbelschicht als Feinanteil im Gas bemerkbar macht, kommt es zu Ablagerungen in den Leitungen (s. **Abb. II.5.1.1-2**).



Abb. II.5.1.1-2: Ablagerungen in der Rohgasstrecke

Beim zweiten Ansatz zeigte sich nach wenigen Stunden, dass der Kompensator zwischen Heißgasfilter und Quenche Undichtigkeiten aufwies. Nach Demontage der entsprechenden Anlagenteile wurde deutlich, dass der Kompensator durch langfristige Belastung mit sauren Gasbestandteilen korrodiert war (s. **Abb. II.5.1.1-3**). Aufgrund des Forschungscharakters der Anlage wird diese nur zeitweise betrieben und ist daher häufigen Temperaturwechseln durch Anfahr- und Abfahrvorgängen sowie Standzeiten ausgesetzt. Letztere begünstigen Korrosionsschäden durch Kondensation der sauren Gasbestandteile.

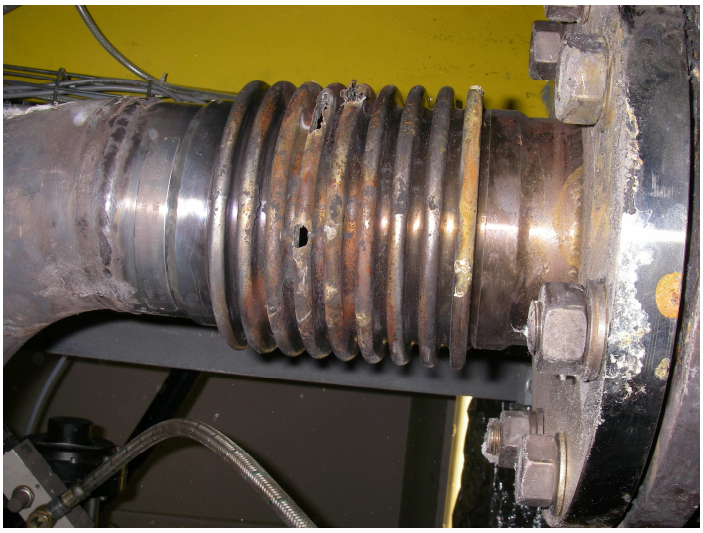


Abb. II.5.1.1-3: Korrodierter Kompensator zwischen Heißgasfilter und Quenche

Die weiteren Versuchswochen konnten ohne größere Probleme durchgeführt werden.

Während des Betriebes mit den entsprechenden Biomassen muss jedoch konsequent auf die Temperaturen in der Wirbelschicht geachtet werden. Sobald die Temperaturen den Bereich der

Ascheerweichung erreichen, besteht die Gefahr des Zusammenbruchs des Wirbelbettes. Die Regulierung der Temperaturen erfolgt meist über die zugeführte Dampfmenge (ca. 400℃) oder über die zugeführte Biomassemenge.

Ebenso sind die regelmäßigen Kontrollen der Druckverhältnisse in der Wirbelschicht wichtig. Zu hohe Drücke besonders im unteren Bereich der Wirbelschicht können ein Anzeichen für Agglomerationen und Verbackungen sein und lassen sich durch ein vermehrtes Betätigen vom Bettascheauslass regulieren.

Nach jeder Versuchswoche wurde die Anlage an den kritischen Rohrleitungen auf Verunreinigungen und Verbackungen untersucht und diese ggf. beseitigt, damit es nicht aufgrund von zusätzlichen Anlagerungen zum Zusetzen kommen konnte.

II.5.1.2 Material der Selbelang I-Woche

Im ersten Versuchsansatz konnte ein kontinuierlicher Betrieb über einen Zeitraum von ca. 3,5 Tagen gefahren werden. Beim Einsatz des Grases kam es zu massiven Betriebsstörungen aufgrund von örtlichen Überschreitungen der Ascheerweichungstemperatur und damit einhergehenden Verbackungen. Unklar ist, ob es signifikant mit dem Gras zusammenhing oder sich erste Ansätze an Material auf den Rohrleitungswänden im vorangegangenen Zeitraum ausbildeten.

Die Versuche zeigten, dass sich mit einem eigentlich wünschenswert niedrigen Vergasungsmitteleinsatz nicht das für die BtL-Synthese erforderliche H_2:CO-Verhältnis einstellt (s. Graph *Mais* in **Abb. II.5.1.2-1**).

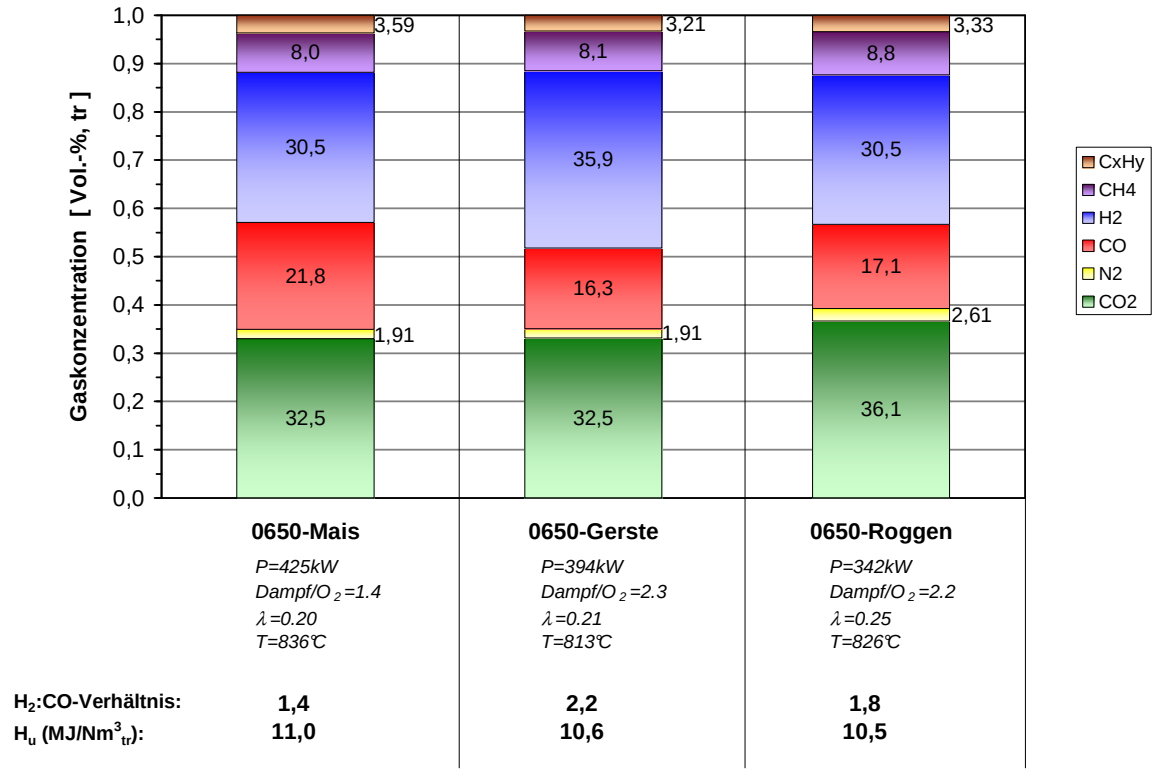


Abb. II.5.1.2-1: Hauptkomponenten, H_2:CO-Verhältnis sowie Heizwert des Reingases

Erst mit einer erhöhten Dampfzufuhr lässt sich das Verhältnis erhöhen.

Nach einer Reinigung etlicher Rohrleitungen an der Wirbelschicht startete ein neuer Versuch des Dauerbetriebs. Diesmal mit einem etwas niedrigeren Temperaturniveau und einem erhöhten λ-Wert von 0,28. Ebenfalls abgesenkt wurde das Niveau der thermischen Leistung auf ca. 320 kW.

Der Dauerbetrieb lieferte zufriedenstellende H_2:CO-Verhältnisse. Gegenüber dem ersten Anlauf konnten für die BtL-Herstellung benötigte Verhältnisse mit allen Materialien erzielt werden. Besonders eine Erhöhung der Dampfzufuhr, wie beim Gras geschehen, lieferte einen sicheren Wert von 2,32. Für die erhöhte Dampferwärmung musste allerdings die Sauerstoffzufuhr stark erhöht werden (s. **Abb. II.5.1.2-2**).

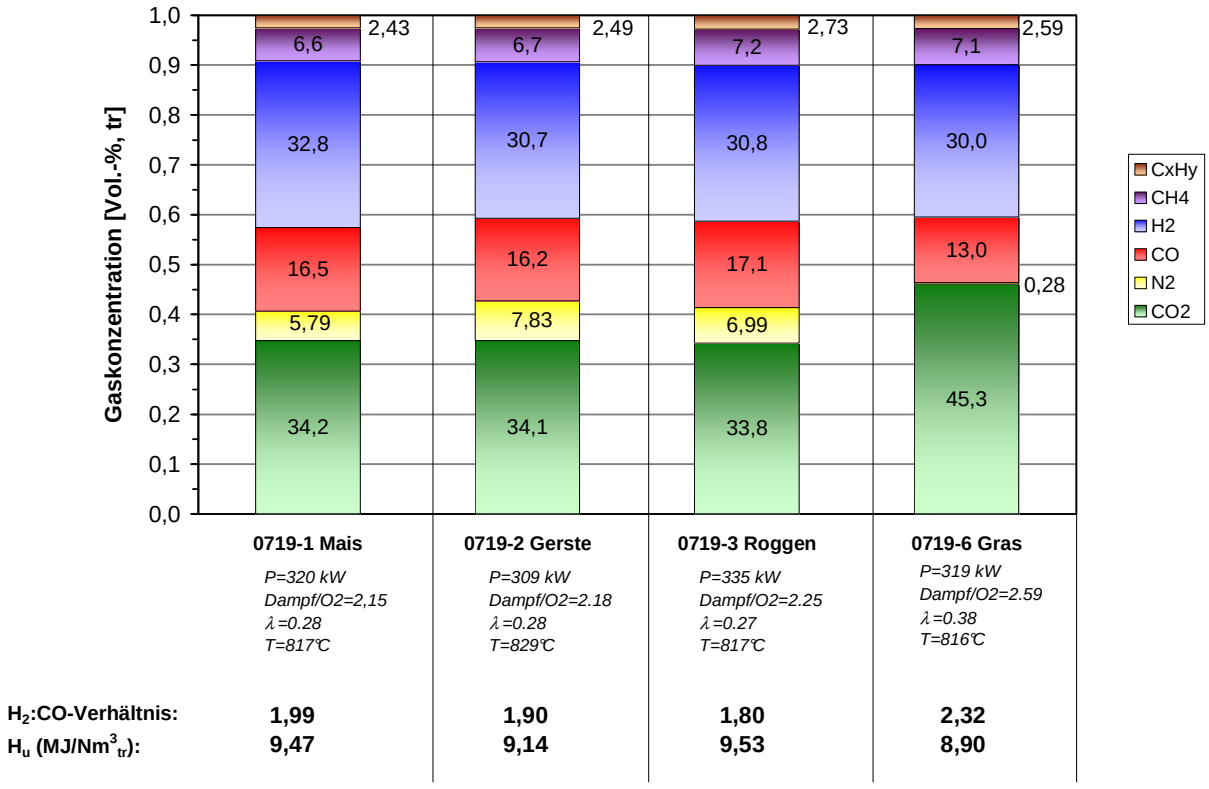


Abb. II.5.1.2-2: Gaszusammensetzung Permanentgas (teer- und wasserfrei)

Die Teergehalte lagen relativ stabil bei 12 bis 16 g/Nm$^3_{tr}$. Der Wassergehalt im Rohgas ist v.a. eine Funktion des Fluidisierungsmittels Dampf (s. **Abb. II.5.1.2-3**).

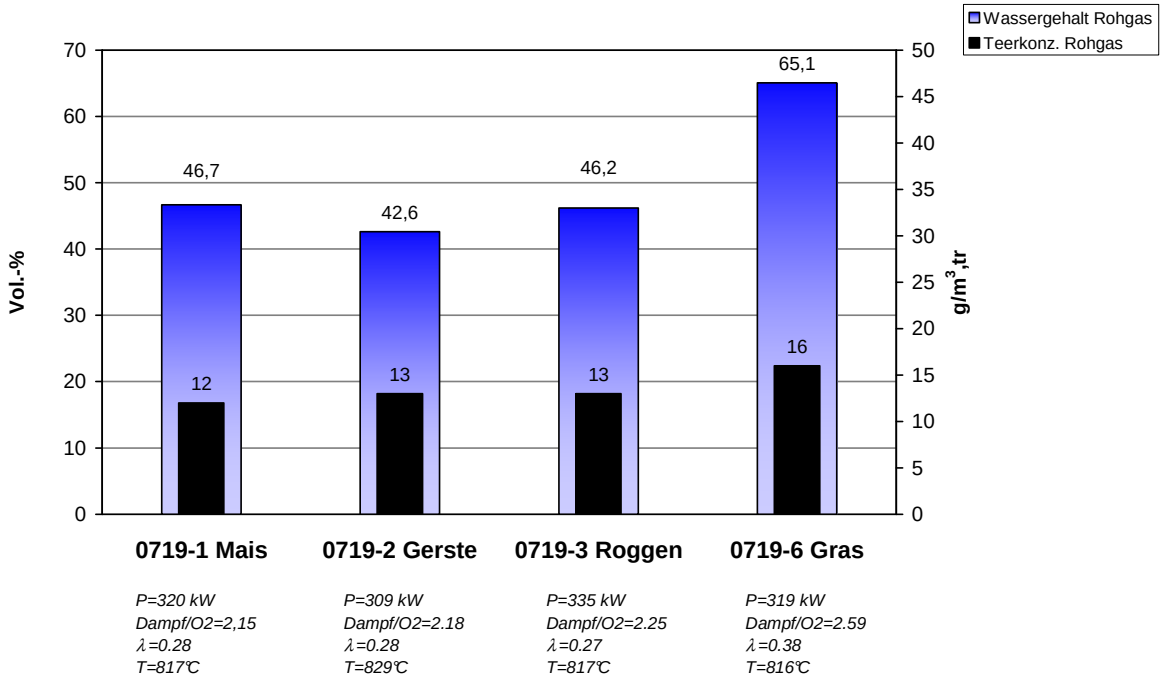


Abb. II.5.1.2-3: Wassergehalte und Teerkonzentrationen

Ein hoher Dampfstrom erfordert eine hohe Teilverbrennung der Biomasse mittels Sauerstoff, um den Dampf von der Eintrittstemperatur von ca. 400 ℃ auf die Reaktionstemperatur aufzuwärmen. Das dabei gebildete Kohlendioxid ist inert und setzt die thermische Effektivität der Vergasung herab. So konnten in den Versuchen trotz eines hohen Kohlenstoffumsatzes von 95 % und mehr nur Kaltgaswirkungsgrade im Bereich von 65 bis 70 % erzielt werden (s. **Abb. II.5.1.2-4**).

Anzustreben ist eine Größenordnung von 80 %. Sie könnte beispielsweise erzielt werden durch einen externen Shift-Reaktor, welcher das gewünschte H_2:CO-Verhältnis unabhängig vom Vergaser einstellt.

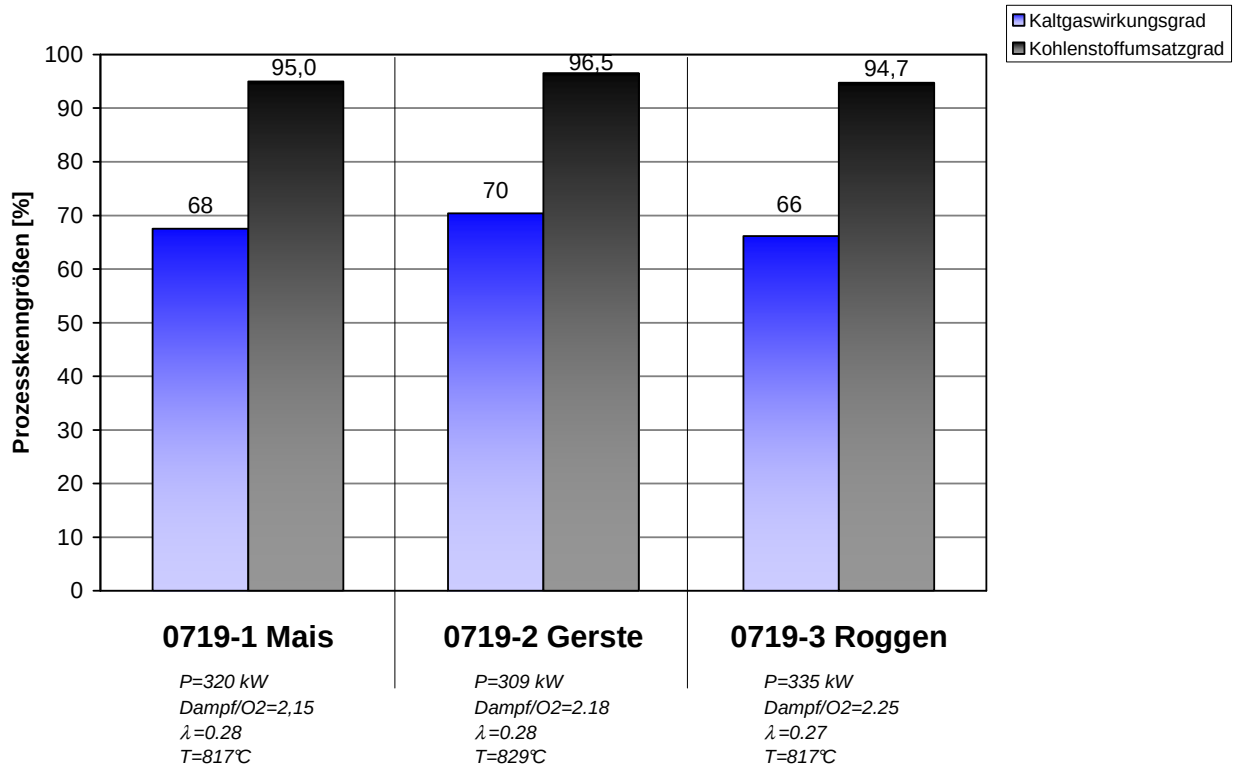


Abb. II.5.1.2-4: Kohlenstoffumsatz und Kaltgaswirkungsgrad

Bem.: *Durch eine verstopfte Leitung zum Heißgasfilter war beim Grasversuch keine ausreichende Kohlenstoffbilanzierung möglich*

In BioLog war zu untersuchen, ob das mit Halmgütern eingebrachte Chlor sich zu 100 % in der Filterasche niederschlägt oder sich im Abgasweg fortsetzt. Die bisher in Clausthal verwendete Messtechnik einer naßchemischen Analyse lieferte i.d.R. Werte unterhalb der Nachweisgrenze. Dieses Ergebnis ließ sich auch bei anderen Institutionen, welche mit Wirbelschicht und Halmgut arbeiten, wiederfinden. Es bestand allerdings der Verdacht eines systematischen Meßfehlers.

Im Vorhaben kam daher erstmals ein Lasergerät zum Einsatz, welches berührungslos direkt im Gas misst. Die Ergebnisse (s. **Abb. II.5.1.2-5**) widersprachen den bisherigen Erfahrungen deutlich: Das Rohgas nach dem Heißgasfilter enthält noch eine bemerkenswerte Menge an Chlorwasserstoff in der Größenordnung von 20 bis 50 mg/Nm^3. Der Wert hängt stark von dem Chlorgehalt der Biomasse ab. Die in Kap. I.2 dargestellte hohe Konzentration bei der Gerste findet sich im Rohgas wieder.

Die Messung für Mais ist wegen ihrer Lage am Versuchsanfang unzuverlässig. Hier können Memory-Effekte aus vorangegangenen Versuchen mit biomassefremden Stoffen eine Rolle spielen.

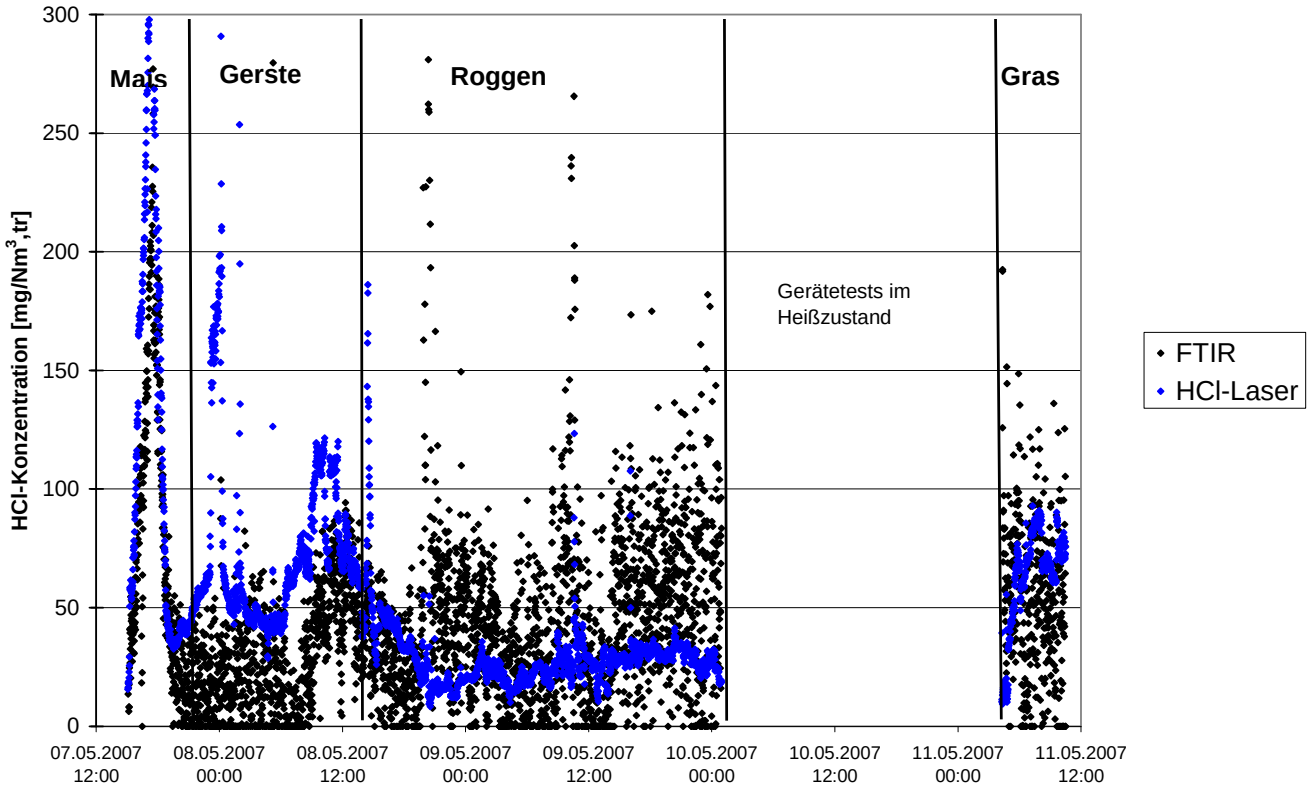


Abb. II.5.1.2-5: HCl-Konzentration im Rohgas und Vergleich mit FTIR-Vergleichsanalyse

Ascheanalysen

Als Reststoffe der Vergasung fallen Bett- und Filteraschen an. Um die Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes der Aschen in der düngemittelherstellenden Industrie auszuloten, wurden Eluat- und Aufschlussuntersuchungen durchgeführt (s. **Tab. II.5.1.2-1**). Hierbei zeigte sich, dass es zu einer Anreicherung von Kalium und Phosphor in der Filterasche kommt (s. **Abb. II.5.1.2-6+7**). Hinsichtlich der Wasserlöslichkeit bestehen Unterschiede zwischen den beiden Elementen. Während Phosphor nur schlecht auslaugbar ist, geht Kalium in die wässrige Phase über. Der Einsatz der Filteraschen als Kalidünger ist somit prinzipiell denkbar. Da aus den Eluatkonzentrationen nicht unmittelbar auf die Pflanzenverfügbarkeit der jeweiligen Elemente geschlossen werden kann, wurden zur weiteren Bewertung der Düngewirksamkeit Gefäßversuche beim Projektpartner TLL durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Teilvorhaben 7 aufgeführt.

Tab. II.5.1.2-1: Aufschluss- und Eluatuntersuchungen der Bett- und Filteraschen bei der Vergasung von Mais-, Gersten- und Roggenpellets

Probenbezeichnung	Parameter	Aufschluss [mg/g]	Eluat [mg/L]
Filterasche 0650-1 Mais	Ca	171	238
	Cd	< 0.003	< 0.02
	Cr	0.1	< 0.05
	Fe	12	< 0.2
	K	39	2710
	Mg	10	< 0.2
	Mo	0.01	0.43
	Na	2	38
	Ni	0.1	< 0.02
	P	19	< 0.02
	Pb	0.02	< 0.02
	S	1.9	108
	Si	28	3.75
	Zn	0.1	< 0.02
	Cl		1400
Filterasche 0650-2 Gerste	Ca	167	9.3
	Cd	< 0.003	< 0.02
	Cr	0.1	< 0.05
	Fe	8.6	< 0.2
	K	40	8280
	Mg	11	< 0.2
	Mo	0.01	0.48
	Na	4	121
	Ni	0.05	< 0.02
	P	22	0.21
	Pb	0.003	< 0.02
	S	1.4	36.6
	Si	33	100
	Zn	0.15	< 0.02
	Cl		4433
Filterasche 0650-3 Roggen	Ca	95	16.1
	Cd	< 0.004	< 0.02
	Cr	0.1	< 0.05
	Fe	5.2	< 0.2
	K	44	4650
	Mg	11	< 0.2
	Mo	0.01	0.46
	Na	2	51.5
	Ni	0.04	< 0.02
	P	20	0.11
	Pb	0.01	< 0.02
	S	1.5	26.5
	Si	40	70.5
	Zn	0.2	< 0.02
	Cl		2067

Probenbezeichnung	Parameter	Aufschluss [mg/g]	Eluat [mg/L]
Bettasche 0650-1 Mais	Ca	372	915
	Cd	< 0.002	< 0.02
	Cr	0.8	< 0.05
	Fe	22	< 0.2
	K	23	55
	Mg	5	< 0.2
	Mo	0.01	0.03
	Na	1.1	3.4
	Ni	0.33	< 0.02
	P	3	< 0.02
	Pb	0.003	< 0.02
	S	2.1	125
	Si	35	0.2
	Zn	0.06	< 0.02
	Cl		6.4
Bettasche 0650-2 Gerste	Ca	312	810
	Cd	< 0.002	< 0.02
	Cr	0.23	< 0.05
	Fe	14	< 0.2
	K	35	80
	Mg	5.6	< 0.2
	Mo	0.003	< 0.02
	Na	2.7	6.4
	Ni	0.08	< 0.02
	P	4.7	0.02
	Pb	0.002	< 0.02
	S	0.39	4
	Si	27	0.23
	Zn	0.16	< 0.02
	Cl		8.9
Bettasche 0650-3 Roggen	Ca	355	825
	Cd	< 0.002	< 0.02
	Cr	0.16	< 0.05
	Fe	12	< 0.2
	K	32	78
	Mg	7.8	< 0.2
	Mo	0.004	< 0.02
	Na	1.8	7.8
	Ni	0.05	< 0.02
	P	5.4	< 0.02
	Pb	0.004	< 0.02
	S	0.23	0.86
	Si	25	0.25
	Zn	0.19	< 0.02
	Cl		5

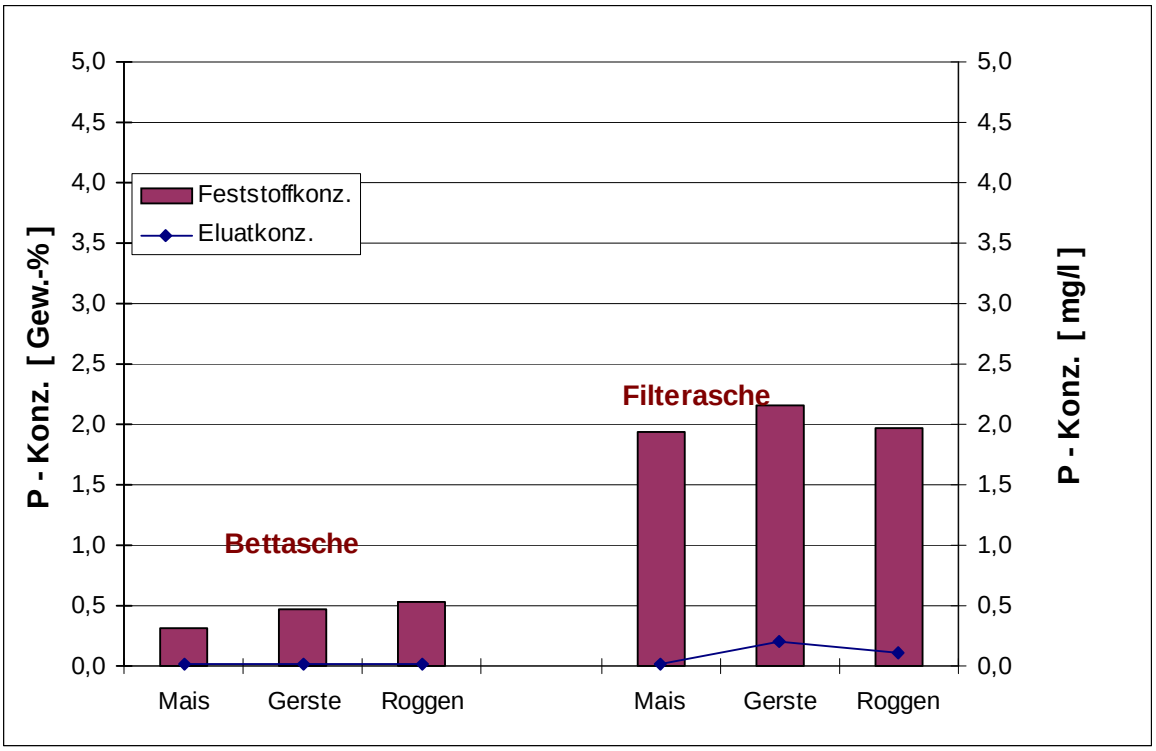


Abb. II.5.1.2-6: Feststoff- und Eluatkonzentrationen des Elementes Kalium in Bett- und Filterasche bei der Vergasung von Mais-, Gersten- und Roggenpellets

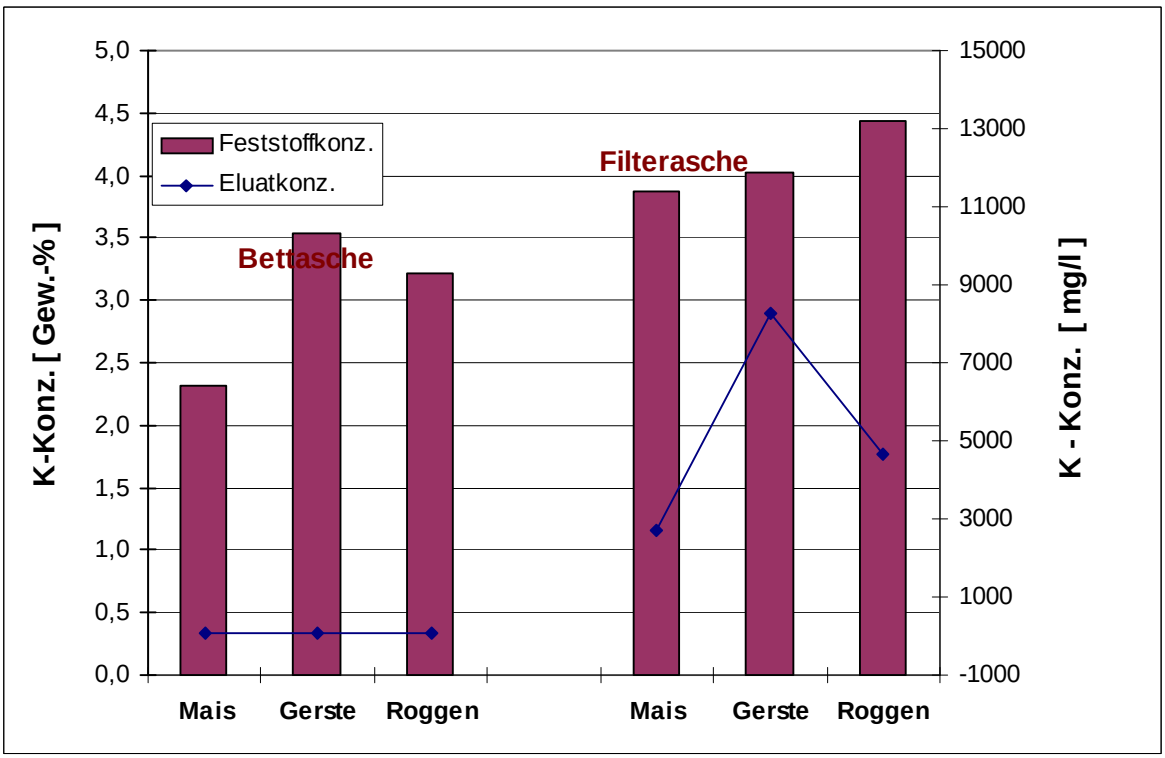


Abb. II.5.1.2-7: Feststoff- und Eluatkonzentrationen des Elementes Phosphor in Bett- und Filterasche bei der Vergasung von Mais-, Gersten- und Roggenpellets

Von den Bett-, Siphon- und Filteraschеproben wurden Rasterelektronenaufnahmen gemacht. Die exemplarischen folgenden Aufnahmen zeigen deutliche Größenunterschiede zwischen der ausgetragenen Bettasche, dem umlaufenden Material (Probenahmestelle Syphon) und der Filterasche (s. **Abb. II.5.1.2-8 bis 10)**

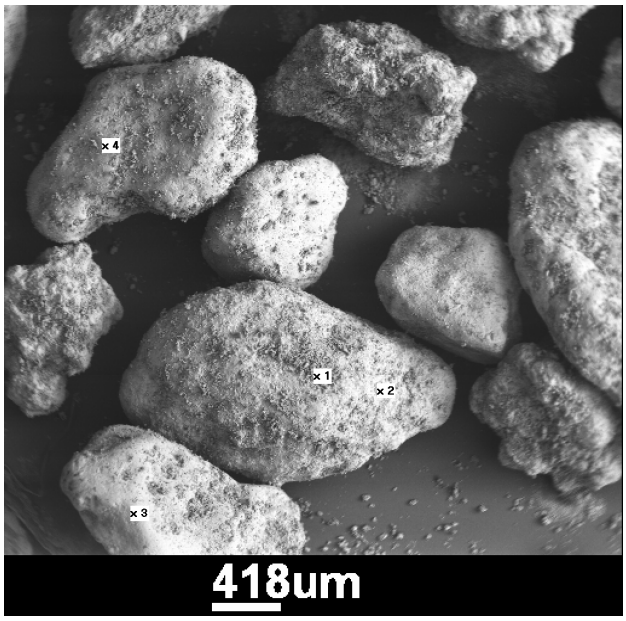


Abb. II.5.1.2-8: REM-Aufnahme Bettasche *(Versuchsdaten: Gerstenpellets, T = 813 ℃, Dampf- / O_2-Verhältnis = 2,3 kg/kg, λ=0,21, Bettmaterial CaO)*

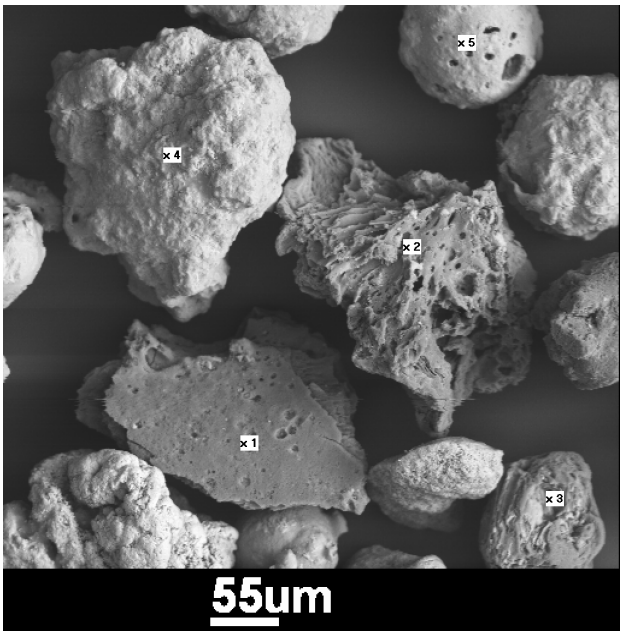


Abb. II.5.1.2-9: REM-Aufnahme Siphonasche *(Versuchsdaten: Maispellets, T = 836 ℃, Dampf- / O_2-Verhältnis = 1,4 kg/kg, λ=0,20, Bettmaterial CaO)*

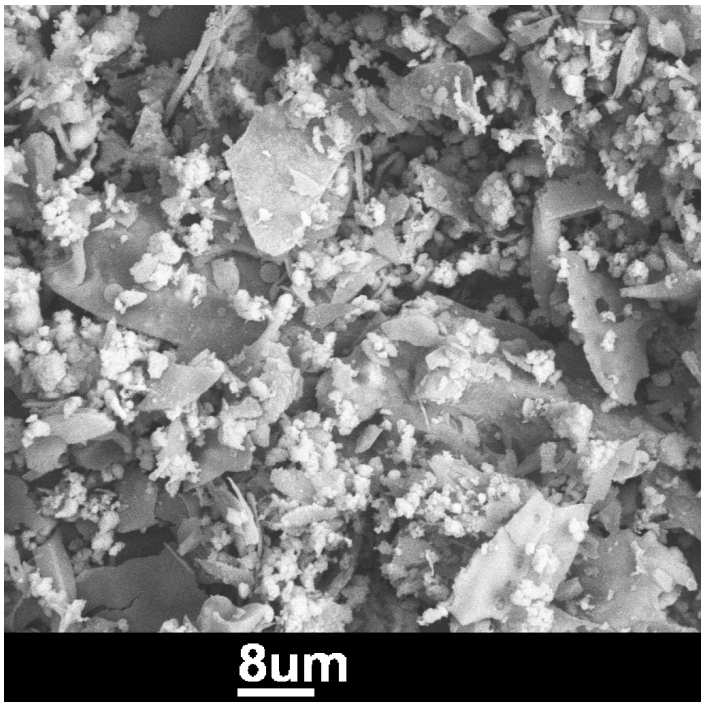


Abb. II.5.1.2-10: REM-Aufnahme Filterasche *(Versuchsdaten: Roggenpellets, T = 817 °C, Dampf-/ O_2-Verhältnis = 2,25 kg/kg, λ=0,27, P_{therm} = 335 kW)*

Die EDX-Analyse über die Fläche in **Abb. II.5.1.2-10** zeigt das Vorhandensein einer Vielzahl von Elementen. So finden sich die in der Biomasse enthaltenen Stoffe Chlor, Phosphor, Magnesium, Kalium und Natrium ebenso wieder wie ungenutzter Kohlenstoff und Calzium v.a. aus der Additivzugabe und Sauerstoff durch die Branntkalkzugabe und aus evtl. Nebenreaktionen (s. **Tab. II.5.1.2-2**).

Tab. II.5.1.2-2: EDX-Analyse der Flächenaufnahme in **Abb. II.5.1.2-10**.

Cl	P	Mg	Ca	K	Na	C	Si	S	Fe	Zn	Al	Ti	Au	O
[Atom - %]														
2,33	1,15	1,24	18,19	6,83	0,19	20,56	2,59	0,00	0,33	0,00	0,40	0,06	12,1	34,04

Bem.: *Goldanteil stammt aus der Besputterung der Proben*

Zu beachten ist, dass der hohe Kohlenstoffwert kein Maß für einen evtl. ungenügenden Umsatz in der Wirbelschicht ist. Da der Ascheanteil in den Pellets nur bei ca 6 Gew.-% liegt, wirken sich geringe Kohlenstoff-Frachten im Synthesegas schon zahlenmäßig stark in der Aschezusammensetzung aus.

Die obige Aufnahme der Filterasche ist repräsentativ für alle Brennstoffpellets. Es ist schon deutlich zu erahnen, dass zwar Sintervorgänge im frühen Stadium mit einer gewissen Halsausbildung stattgefunden haben, sich dies aber auf die sehr feinen Partikel unterhalb ca.

1 µm beschränkt. Der Eindruck wird verstärkt, wenn eine noch höhere Auflösung gewählt wird (s. **Abb. II.5.1.2-11**).

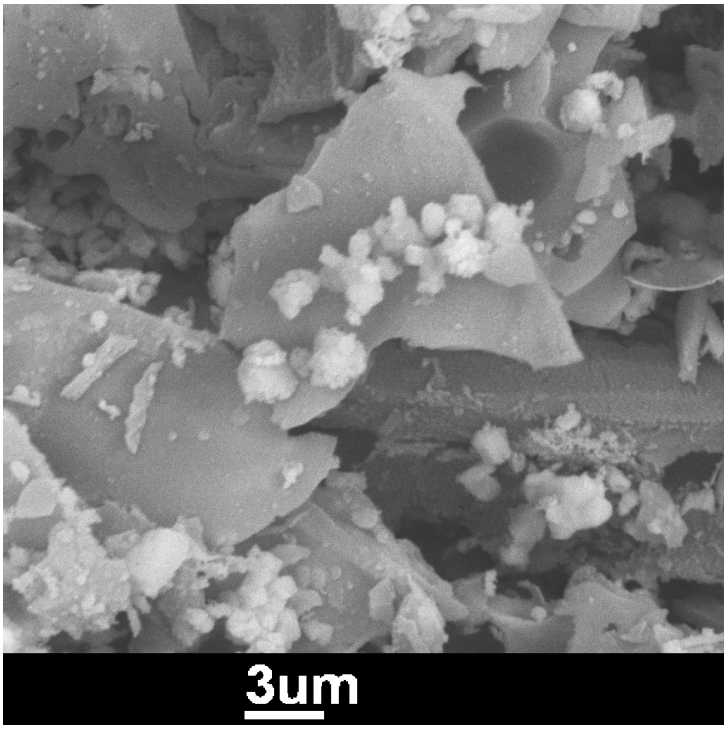


Abb. II.5.1.2-11: REM-Aufnahme Roggenasche

Die durch Verbackungen erhaltenen Partikeldurchmesser in der Größenordung von ca. 3 µm liegen weit unterhalb des Partikeldurchmessers des umlaufenden Bettmaterials in der Größenordnung von 150 µm (s. **Abb. II.5.1.2-9**). Eine Störung des Betriebes unter den gewählten Verfahrensparametern ist somit nicht zu erwarten, solange sehr heiße oder kalte Stellen vermieden werden.

II.5.1.3 Material der Selbelang II-Woche

Die thermische Leistung bei den Versuchen betrug zwischen 270 und 360 kW. Die Brennstoffmassenströme lagen im Bereich von ca. 62 bis 82 kg/h. Zum Ausgleich der Wärmeverluste wurde über eine elektrische Begleitheizung Energie eingekoppelt. Die Leistung der Reaktorbegleitheizung schwankte zwischen 21-33 kW.

Der Volumenstrom des Permanentgases bewegte sich zwischen ca. 46-70 Nm^3/h.

Die Gasausbeute der Versuchspunkte betrug 0,75-0,99 Nm^3_{PG}/kg_{BM}. Die höchsten Gasausbeuten (>0,97 Nm^3_{PG}/kg_{BM}) konnten bei den Maissilagepellets und den Grassilagepellets erreicht werden.

Bei den Versuchseinstellungen 0821-4 und -5 liegt der Unterschied der Biomassen nur in den Häcksellängen des Grases vorm Silieren, Trocknen und Pelletieren. Dieser Unterschied macht sich in der Biomassevorbereitung bemerkbar (Pressen), jedoch waren keine signifikanten Auswirkungen auf den Vergasungsbetrieb festzustellen.

Im Unterschied zu Versuchen mit dem Selbelang I-Material wurde die Vergasungstemperatur weiter abgesenkt. Zur Vermeidung eines hohen Betriebsmittelverbrauchs an Dampf wurde das Dampf:O_2-Verhältnis erniedrigt um zu schauen, ob sich in Ergänzung zur abgesenkten Reaktortemperatur ein stabiler Betrieb erzielen lässt.

Die Versuchswoche verlief nun problemlos, selbst beim Gras (s. **Abb. II.5.1.3-1**)

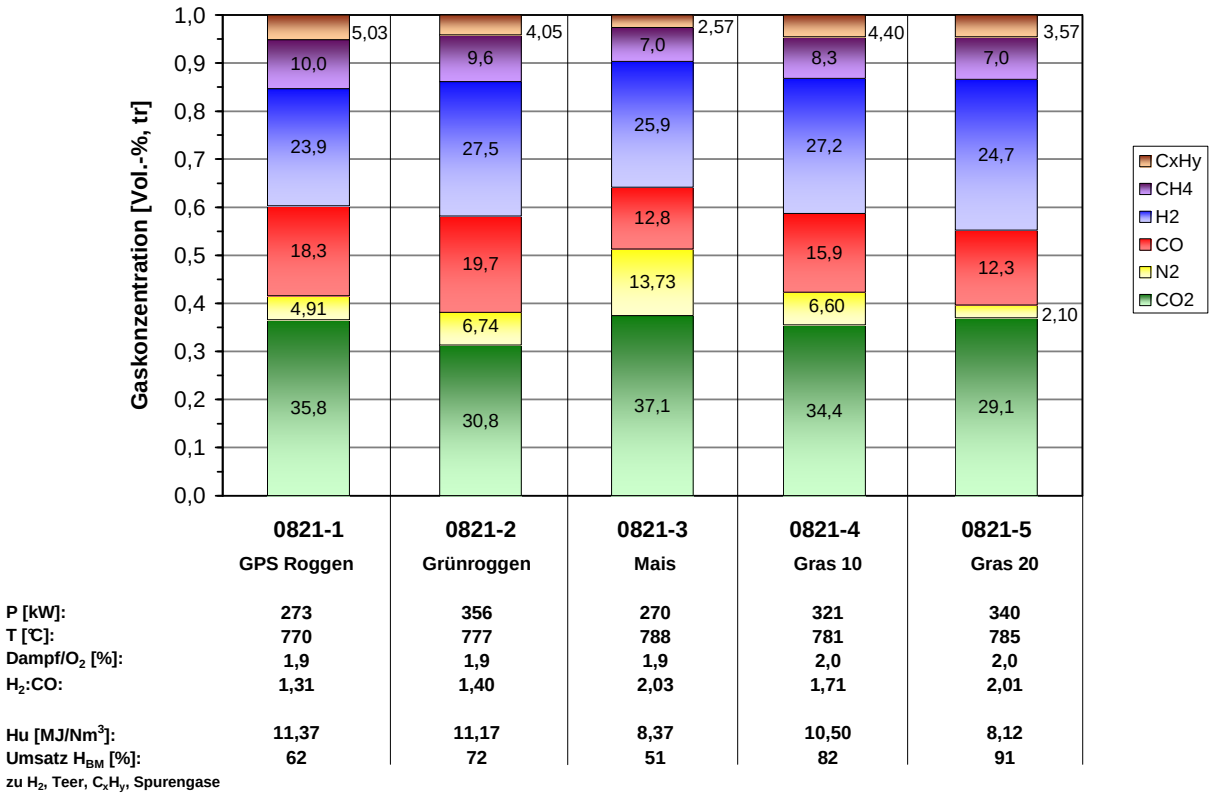


Abb. II.5.1.3-1: Zusammensetzung des Permanentgases (teer- und wasserfrei)

Allerdings ließ sich das notwendige H_2:CO-Verhältnis für die FTS nicht mehr gesichert erreichen.

Trotz des nur geringfügig abgesenkten Temperaturniveaus um ca. 40 bis 50 ℃ stieg der Teergehalt im Rohgas deutlich an (s. **Abb. II.5.1.3-2**). Hier waren deutliche Unterschiede zwischen den Biomassen festzustellen. So lieferte Mais den geringsten Wert, während Gras im Mittelfeld lag und Roggen die Spitzenwerte verursachte.

Teere sind das Resultat eines unvollständigen Brennstoffumsatzes mit vielen Nebenreaktionen. Daher soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass das Ergebnis keine Wertung der Biomassen impliziert. Durch die hohe Abhängigkeit der Teerbildung im Temperaturbereich von 750 bis 850 ℃ (s. Kap. II.5.1.4) lässt sich durch eine geringe Temperaturanhebung das Teerniveau signifikant absenken.

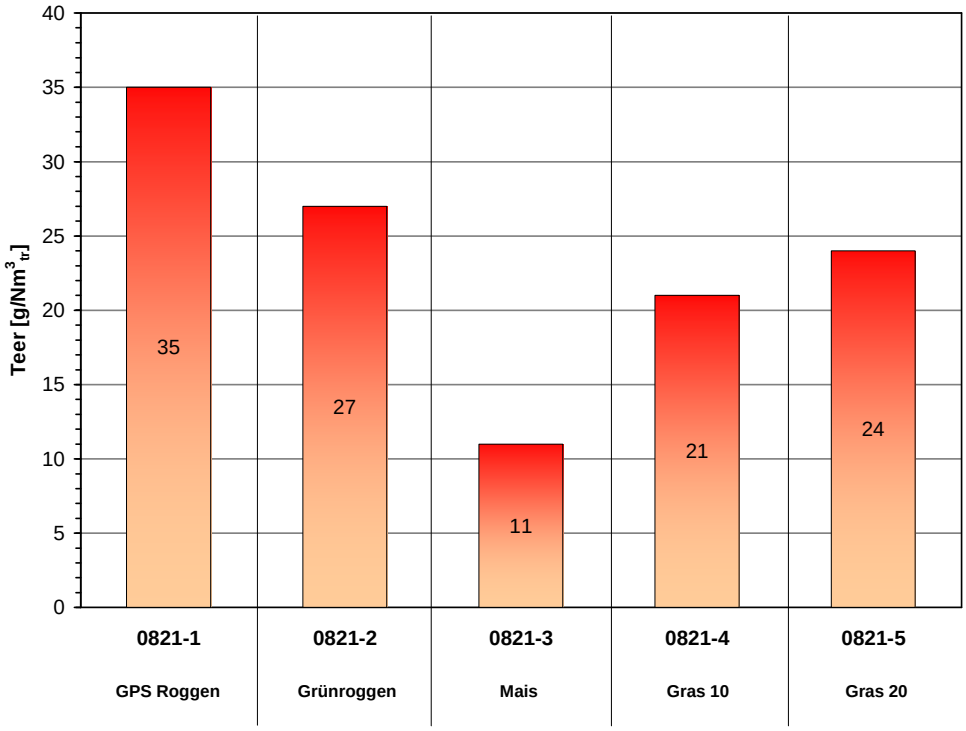


Abb. II.5.1.3-2: Teergehalte der Selbelang II-Versuchswoche

Der ungenügende Kohlenstoffumsatz lässt sich auch quantitativ fassen. So lag der Bereich von 85 bis 94 % deutlich unter den Werten der letzten Versuchswoche, wo 95 % und mehr erreicht wurden. Außer der Bildung an Nebenprodukten schlägt sich der ungenügende Umsatz in niedrigen Kaltgaswirkungsgraden nieder (s. **Abb. II.5.1.3-3**).

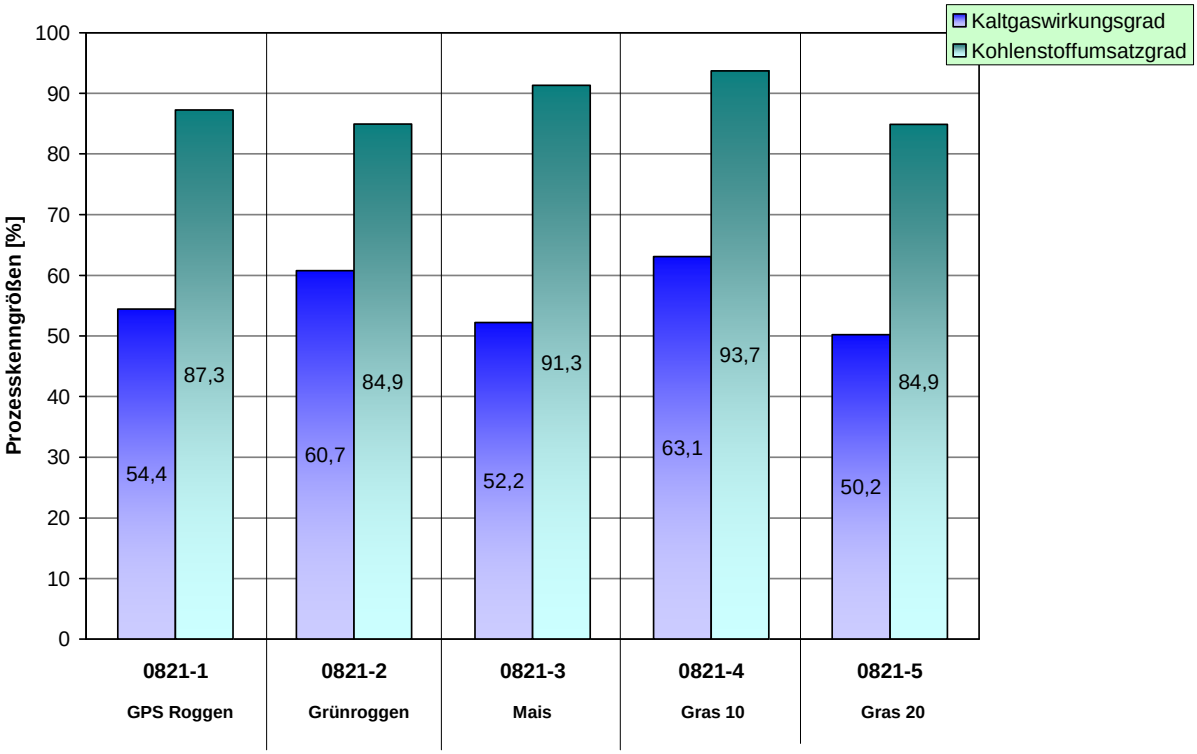


Abb. II.5.1.3-3: Kaltgaswirkungsgrad und Kohlenstoffumsatz

Für die Massen- und Energiebilanzierung ist es wichtig, nebem dem brennstofftechnischen Kennwerten wie dem spezifischen Sauerstoffbedarf λ (bezogen auf stöchiometrische Verbrennung), auch Mengenangaben darzustellen. Wie aus **Abb. II.5.1.3-4** ersichtlich, lag in den Versuchen die Sauerstoffzufuhr bei 250 bis 350 g Sauerstoff pro kg trockener Biomasse.

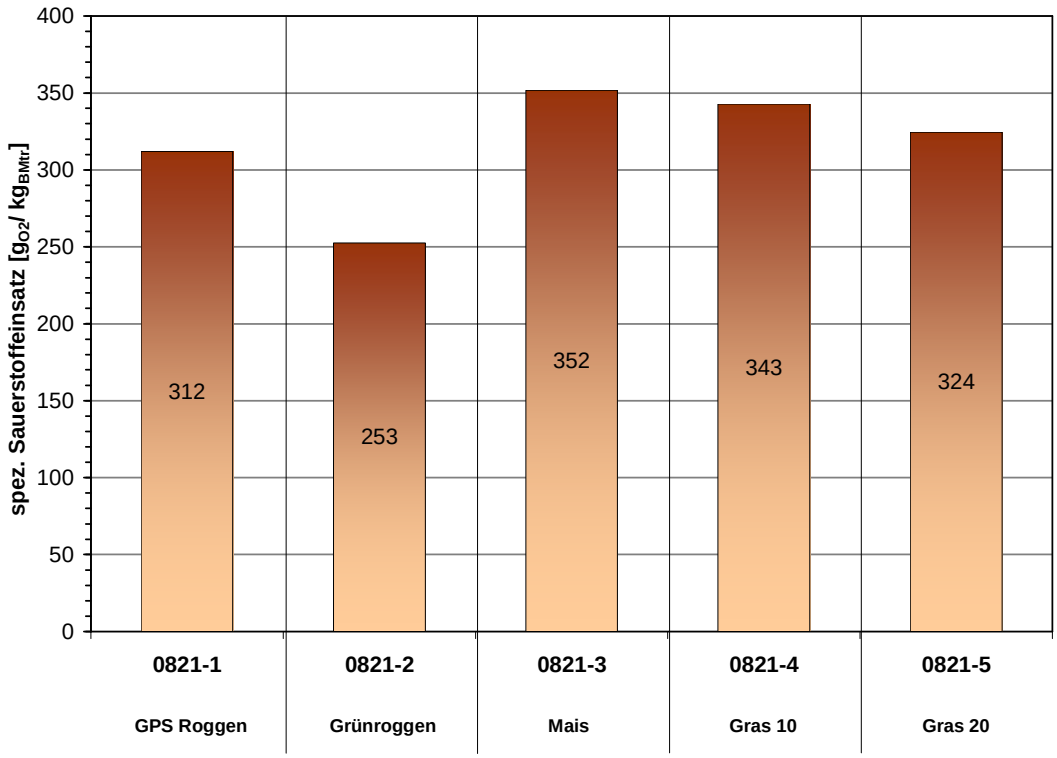


Abb. II.5.1.3-4: Spezifischer Sauerstoffbedarf, bezogen auf trockene Biomasse

Wie vorher schon erwähnt, hängt der exakte Wert vom Temperaturniveau und der zugeführten Dampfmenge ab. Im Falle sehr feuchter Biomasse wie z.B. Silage würde sich der Wert erhöhen, da die Verdampfung des Wassers thermische Energie aus exothermen Verbrennungsreaktionen erfordert. Die Abbildung ist daher ein Richtwert für relativ trocken zugeführte Halmgüter, d.h. bis ca. 10 Gew.-% Wassergehalt.

Die gleiche Argumentation wie für den Sauerstoff gilt auch für die Dampfmenge (s. **Abb. II.5.1.3-5**). Hier lässt sich ein Bereich von ca. 0,45 bis 0,70 kg Dampf pro kg trockener Biomasse zahlenmäßig fassen.

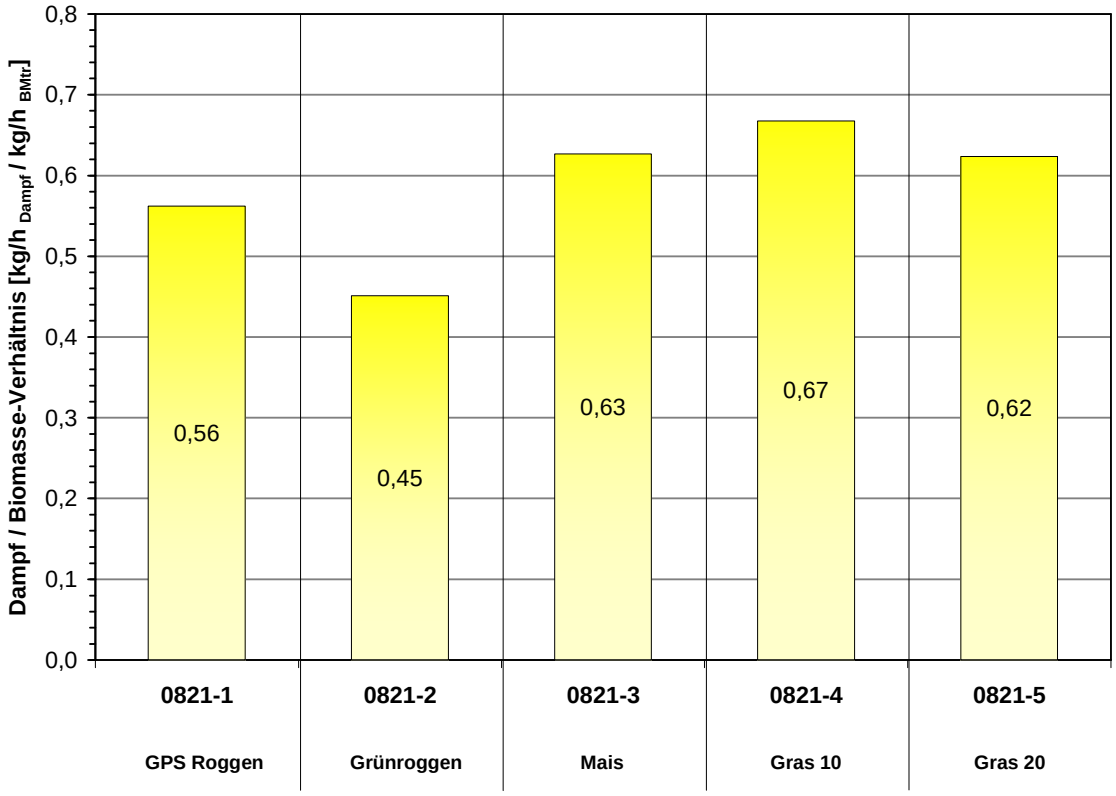
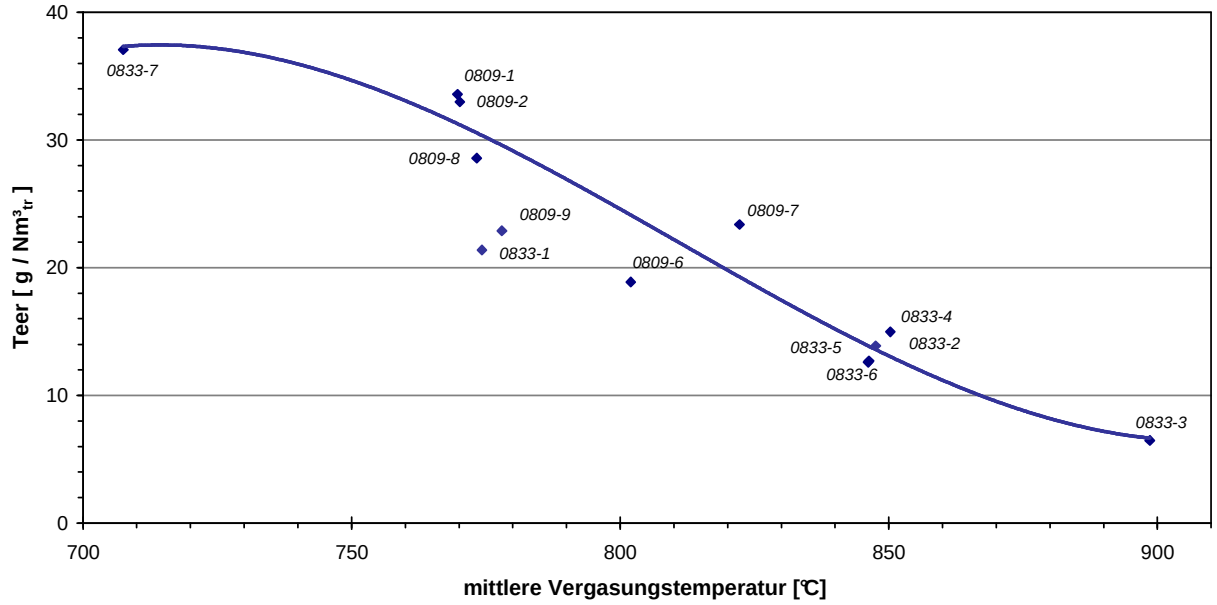


Abb. II.5.1.3-5: Spezifischer Dampfbedarf, bezogen auf trockene Biomasse

II.5.1.4 Variation von Verfahrensparametern am Brennstoff Holz

Wie in den Versuchen mit den Pellets aus Halmgütern zu erkennen war, können sich geringe Unterschiede bei verfahrenstechnischen Parametern wie dem Temperaturniveau oder der Dampfzufuhr auf Ergebnisse wie den Teergehalt oder das H_2:CO-Verhältnis auswirken. Systematische Untersuchungen in einem ausreichend großen Temperaturintervall von ca 700 bis 900 ℃ aber waren wegen der Ascheerweichung nic ht möglich. Daher wurde ein Versuchsprogramm nachgeschaltet mit Holz als Brennstoff, welcher dem Intervallwunsch nachkommen kann.

Im Versuchsprogramm waren Tendenzen darzustellen und signifikante Einflussparameter herauszuarbeiten, welche ansonsten in Meßungenauigkeiten oder Einflüssen anderer Parameter untergehen würden. So kam bei den Versuchen deutlich quantitativ zutage, dass die Teerbildung stark von der Temperatur abhängt (s. **Abb. II.5.1.4-1**)

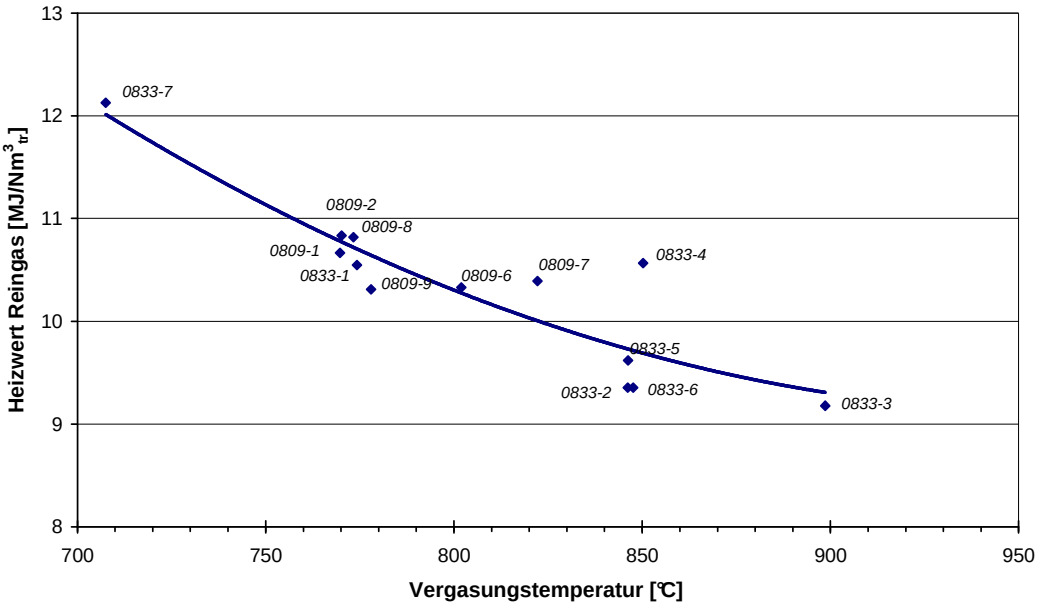


	0809-1	0809-2	0809-6	0809-7	0809-8	0809-9 Kalk 2	0833-1 ohne	0833-2 ohne	0833-3	0833-4	0833-5	0833-6	0833-7
P [kW]:	375	386	344	350	352	352	307	330	341	355	352	361	299
T [℃]:	770	770	802	822	773	778	774	848	899	850	846	846	708
Dampf/O_2 [%]:	2,3	2,34	3,46	2,33	1,76	1,73	1,63	1,66	1,72	1,73	1,70	1,64	1,89
H_2:CO:	1,37	1,37	1,82	1,45	1,24	1,11	1,13	1,46	1,74	1,28	1,55	1,39	1,33

Abb. II.5.1.4-1: Teergehalte aller Versuchspunkte, aufgetragen über der mittleren Vergasungstemperatur.

Es wird deutlich, dass sich bei einer Erhöhung der Vergasungstemperatur von 800 auf 900 ℃ der Teergehalt mehr als halbiert.

Dies ist für die Verfahrensführung grundsätzlich zu begrüßen. Die Heizwertbetrachtung aber zeigt, dass mit einem geringeren Teergehalt deutlich weniger thermische Energie im Gas gespeichert ist (s. **Abb. II.5.1.4-2**). Für den Falle einer thermischen Nutzung des Gases z.B. im Blockheizkraftwerk ist daraus die Schlussfolgerung zu ziehen, dass eine niedrige Temperatur Vorteile hat, wenn der Teer abgetrennt und prozessintern verwertet werden kann.



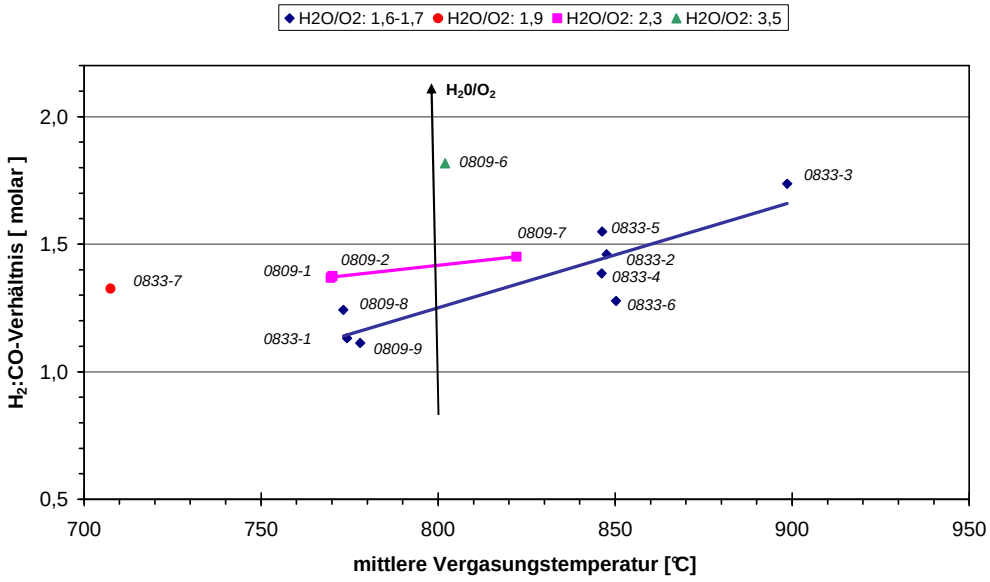
	0809-1	0809-2	0809-6	0809-7	0809-8	0809-9 Kalk 2	0833-1 ohne	0833-2 ohne	0833-3	0833-4	0833-5	0833-6	0833-7
P [kW]:	375	386	344	350	352	352	307	330	341	355	352	361	299
T [℃]:	770	770	802	822	773	778	774	848	899	850	846	846	708
Dampf/O_2 [%]:	2,3	2,34	3,46	2,33	1,76	1,73	1,63	1,66	1,72	1,73	1,70	1,64	1,89
H_2:CO:	1,37	1,37	1,82	1,45	1,24	1,11	1,13	1,46	1,74	1,28	1,55	1,39	1,33

Abb. II.5.1.4-2: Heizwerte der Versuchspunkte, aufgetragen über der mittleren Vergasungstemperatur

Bei einer Nutzung des Gases zur Synthese dagegen ist diese Schlussfolgerung so nicht möglich. Die Ursache liegt in dem Umstand, dass die Routen zur Kraftstoffherstellung bestimmte H_2:CO-Verhältnisse benötigen, welche durch die Biomasse nicht geliefert werden können. So benötigt die BtL-Herstellung mit eisenbasierten Katalysator ein Verhältnis von ca. 1,75:1 und bei cobaltbasiertem Katalysator sind es ca. 2,1:1. Wird über die Herstellung von SNG als gasförmigen Kraftstoff nachgedacht, so sind es gar 3:1.

Im Rahmen der Versuche stellte sich heraus, dass über verschiedene Verfahrensparameter das H_2:CO-Verhältnis beeinflusst werden kann (s. **Abb. II.5.1.4-3**).

Ein signifikanter Parameter ist wieder die Vergasungstemperatur: Je höher diese liegt, desto größer ist das gewünschte Molverhältnis. Dabei ist der Effekt aber nicht so deutlich wie bei den Größen Teer und Heizwert. Eine Überlagerung durch das Dampf- zu Sauerstoffverhältnis findet statt. Wie aus der Literatur bekannt (z.B. 5) wird durch die Dampfreformierung im Reaktor Wasserstoff erzeugt.



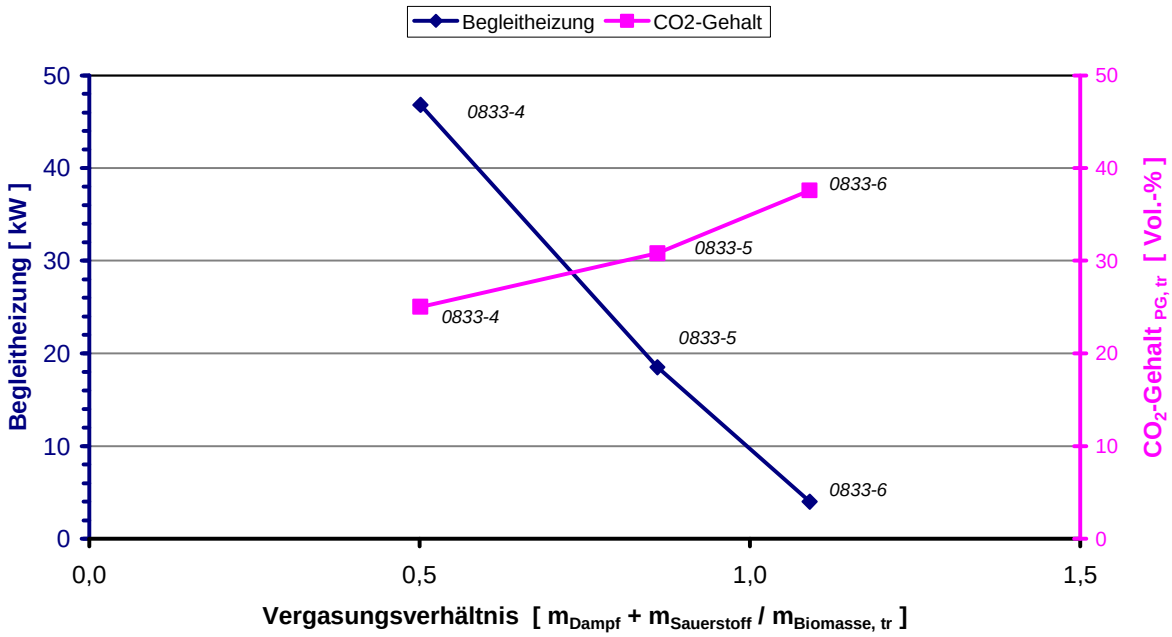
	0809-1	0809-2	0809-6	0809-7	0809-8	0809-9 Kalk 2	0833-1 ohne	0833-2 ohne	0833-3	0833-4	0833-5	0833-6	0833-7
P [kW]:	375	386	344	350	352	352	307	330	341	355	352	361	299
T [℃]:	770	770	802	822	773	778	774	848	899	850	846	846	708
Dampf/O_2 [%]:	2,3	2,34	3,46	2,33	1,76	1,73	1,63	1,66	1,72	1,73	1,70	1,64	1,89
H_2:CO:	1,37	1,37	1,82	1,45	1,24	1,11	1,13	1,46	1,74	1,28	1,55	1,39	1,33

Abb. II.5.1.4-3: H_2/CO-Verhältnis, aufgetragen über der mittleren Vergasungstemperatur

Die Dampferhitzung auf Reaktortemperatur aber benötigt wiederum Energie, welche durch eine Teilverbrennung der Biomasse durch eine erhöhte Sauerstoffzufuhr aufzubringen ist. Damit steigt der Kohlendioxid-Gehalt im Synthesegas (s. **Abb. II.5.1.4-4**).

Da der Kohlenstoff im CO_2 für weitere Nutzungen verloren ist, wird das erhöhte H_2:CO-Verhältnis mit einer verschlechterten thermischen Effektivität erkauft (Punkt 0833-4 ≈ 63 %, 0833-5 ≈ 57 % und 0833-6 ≈ 47 %).

In den Versuchen wurde auch betrachtet, wie sich die Wärmeabfuhr über die Reaktorwände auswirkt. Die Technikumsanlage ist mit einer Begleitheizung ausgestattet, um das gegenüber einer kommerziellen Anlage hohe Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis und die fehlende Isolierung der Reaktorwände zumindest teilweise zu kompensieren. Deutlich zu sehen ist, dass mit einer Erhöhung des Wärmeverlustes das Vergasungsverhältnis gesteigert werden muss, um die gewünschte Reaktortemperatur zu halten.



P [kW] = 352-361 = const
T [℃] = 846-850 = const
Dampf / O_2 [%] = 1,64-1,73 = const

Abb. II.5.1.4-4: Leistung der Begleitheizung und CO_2-Gehalt des Permanentgases vergleichbarer Versuchspunkte, aufgetragen über dem Vergasungsverhältnis

Abschließend sei noch bemerkt, dass beim Brennstoff Holz in all den Versuchen kein nennenswerter Einfluss des Branntkalkes festzustellen war. Selbst wenn auf seinen Einsatz völlig verzichtet wird, tritt keine eindeutige Qualitätsveränderung des Synthesegases hinsichtlich des Teergehaltes ein.

II.5.2 Verbrennung

II.5.2.1 Betriebserfahrungen

Der Eintrag der Maissilagepellets bereitete mit dem installierten Eintragssystem keine Probleme. Auch die größere Pelletfraktion, die aufgrund schlechter Pelletiereigenschaften überwiegend aus sehr feinen Partikeln bestand, ließ sich gut fördern. Die Zudosierung des groben Kalkes (<1 cm Siebdurchgang) führte zeitweise zu Blockierungen der Dosierschnecke, die sich aber relativ leicht wieder beheben ließen.

Während der Kalkzugabe hielten sich die Verschlackungen in Grenzen. Jedoch beinhaltete die ausgetragene Schlacke hohe Mengen an Kalk, was zu einem Auflösen der Schlackebrocken im Wasserbad des Nassentschlackers führte. Es entstand ein dickflüssiger Schlamm, der durch den Schieber im Nassentschlacker nicht ausgetragen werden konnte (s. **Abb. II.5.2.1-1**).



Abb. II.5.2.1-1: Nassentschlacker bei Kalkzugabe

Um den Austrag der Schlacke zu gewährleisten wurde die Kalkzugabe eingestellt. Als Folge bildeten sich große Schlackebrocken auf dem Rost, die stündlich manuell entfernt werden mussten (s. **Abb. II.5.2.1-2**). Bei der Entfernung der Brocken kam es zu einem Nachrutschen und spontanen Entzünden des vorher abgedeckten Materials, was zu hohen Leistungsspitzen führte. Der Austrag der Schlacke erfolgte währenddessen in fester Form (s. **Abb. II.5.2.1-3**).



Abb. II.5.2.1-2: Schlackebrocken beim manuellen Austrag aus dem Feuerraum



Abb. II.5.2.1-3: Austrag Nassentschlacker ohne Kalkzugabe

Nach Versuchende wurde die Anlage auf Ablagerungen untersucht. Einige Anbackungen bildeten sich aufgrund der hohen Temperaturen (Ascheerweichungspunkt überschritten) im ersten Zug über dem Rost. Ablagerungen waren außerdem im unteren Bereich der Nachbrennkammer und im Kanal von der Nachbrennkammer zum Wärmeübertrager zu finden. Überraschenderweise befanden sich kaum Ablagerungen auf den Rohren sowie im unteren Bereich des Wärmeübertragers (s. **Abb. II.5.2.1-4**).



Abb. II.5.2.1-4: Ablagerungen auf den Rohren und im unteren Teil des Wärmetauschers

II.5.2.2 Ascheanalysen

Die Beprobung für die Ascheanalysen erfolgte in einem Versuchszeitraum ohne Kalksteinzugabe und festen Zustandes der Rostasche nach dem Nassentschlacker.

Die **Filterasche** fällt sehr feinkörnig mit relativ homogener Partikelgrößenverteilung an (s. **Abb. II.5.2.2-1**). Zusammengeschmolzene grobe Partikel sind nicht zu sehen.

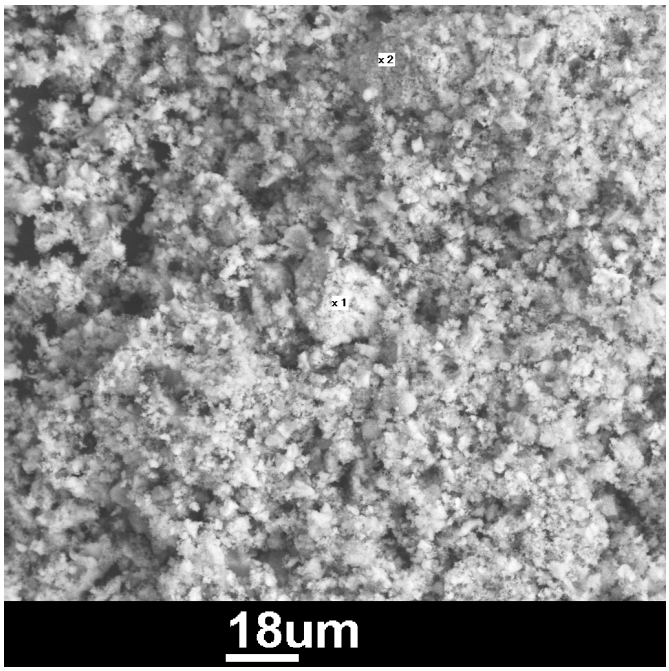


Abb. II.5.2.2-1: Gewebefilterasche

Die EDX-Analyse zeigt hohe Anteile an Silizium und Alkali sowie Erdalkali (s. **Tab. II.5.2.2-1)**. Die Verteilung ist nicht homogen. Es sind silizium- und calziumreiche Partikel auszumachen.

Tab. II.5.2.2-1: Beispielhafte EDX-Analyse der REM-Untersuchungen

Filterasche 0816-4

	Partikel 1		Partikel 2	
Element	**Gew.-%**	**Mol-%**	**Gew.-%**	**Mol-%**
Si	30,41	25,25	10,52	8,91
(Al*	3,06	2,65	8,54	7,53)
Mg	4,28	4,10	0,89	0,87
K	12,67	7,55	3,41	2,07
Ca	9,22	5,36	30,53	18,12
Ti	0,34	0,16	0,18	0,09
Fe	3,01	1,26	1,35	0,57
Na	0,52	0,52	0,78	0,81
S	-	-	4,88	3,62
P	-	-	0,60	0,46
O	36,48	53,13	38,32	56,95
TOTAL	100,00		100,00	

***Bem.:** Der Wert für das Aluminium ist unter Vorbehalt zu betrachten, da das Proben-Trägermaterial eine Rolle spielen kann*

Völlig im Gegensatz zur Morphologie der Filterasche steht die **Rostasche**. Das Material muß zur Analyse mechanisch zerkleinert werden. Unter dem REM zeigt sich, daß die Körner sehr groß und zusammengeschmolzen sind (s. **Abb. II.5.2.2-2**).

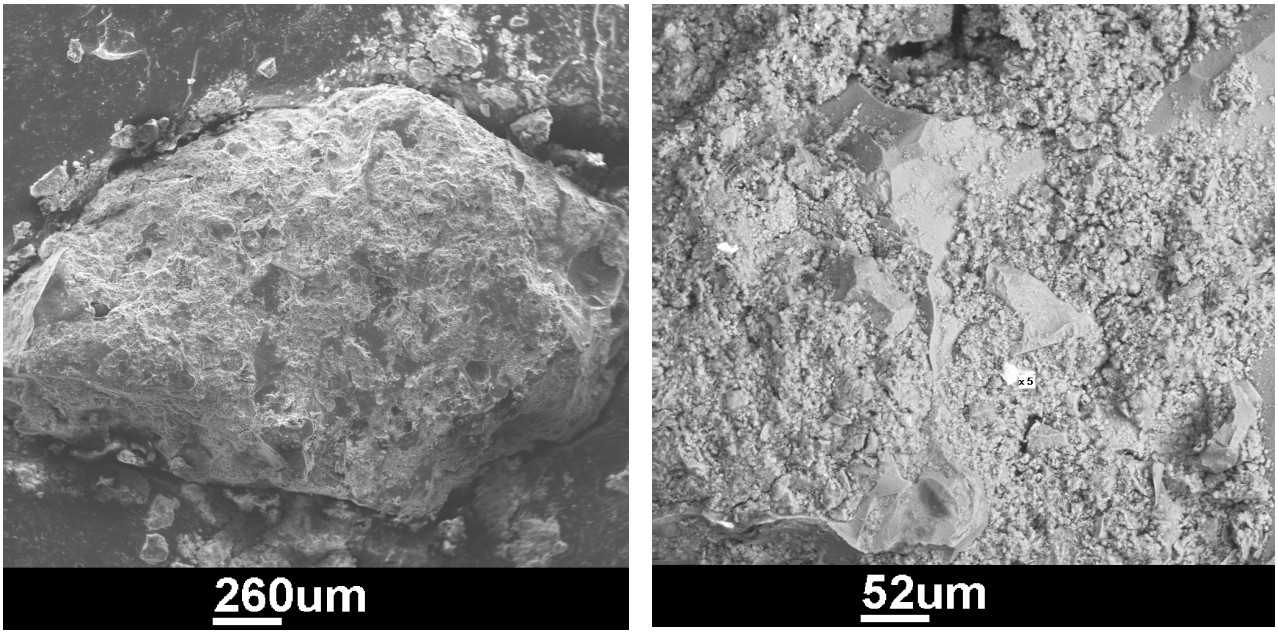


Abb. II.5.2.2-2: Beispielhaftes Rostaschekorn bei unterschiedlichen Vergrößerungen

Die EDX-Werte streuen, je nach Messort, wie bei der Filterasche. Quantitativ ist kein Unterschied zur **Tab. II.5.2.2-1** festzustellen. Auch die Rostasche enthält hohe Anteile an Alkali und Erdalkali, welche offensichtlich nicht in die Gasphase übergehen konnten.

II.5.2.3 Emissionswerte

Während des Betriebes wurden Abgasanalysen mittels FTIR (**F**ourier-**T**ransformations-**IR**-Spektroskopie) kontinuierlich durchgeführt. Die Messstelle befand sich nach dem Wärmeübertrager und damit vor dem Flugstromreaktor mit der Kalkhydratzugabe.

Die Ergebnisse bei einem Bezugssauerstoff von 11 % sind in **Abb. II.5.2.3-1** dargestellt. Die starken Schwankungen resultieren aus den Leistungsspitzen, die während des manuellen Entschlackens entstanden sind. Am 18.04.08 gegen acht Uhr kam es zu einem kurzzeitigen Ausfall des PLS-Servers. Daher existieren für diesen Zeitraum keine Messwerte.

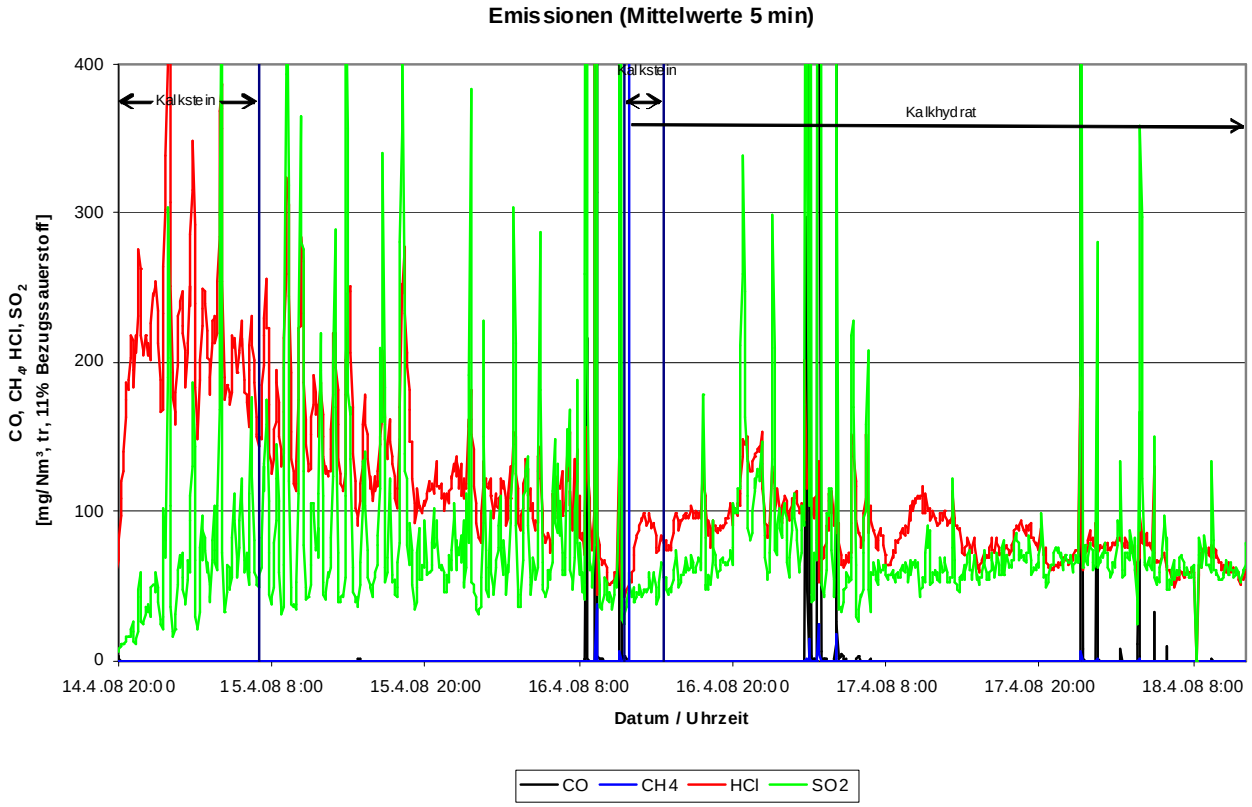


Abb. II.5.2.3-1: Verlauf der Emissionswerte wichtiger Verbindungen

Deutlich zu sehen ist, dass die HCl-Werte ca. zwei Tage benötigen, um sich bei ca. 80 bis 100 mg/Nm^3_{tr} einzupegeln. Die Ursache ist unbekannt. Möglicherweise findet eine Freisetzung aus Ablagerungen alter Versuche statt. Kurzzeitige Spitzen bis ca. 150 mg/Nm^3_{tr} sind möglich. Der Wertebereich sowie die temporären Überschreitungen liegen deutlich über gesetzlichen Werten. So erlaubt die TA-Luft im Kap. 5.2.4 *Gasförmige anorganische Stoffe, Klasse III* nur 30 mg/Nm^3_{tr} oder alternativ einen maximalen Massenstrom von 0,15 kg/h. Die 17. BImschV sieht nur 10 mg/Nm^3_{tr} als Tagesmittelwert beim Bezugssauerstoffgehalt vor.

Beim Schwefel ist die Überschreitung der gesetzlichen Werte nicht so dramatisch. Der Wert von ca. 80 mg/Nm^3_{tr} wird bei Anwendung der TA-Luft [6] (zulässig 350 mg/ Nm^3_{tr} bei der Einordnung in Kap. 5.2.4, *Klasse IV* oder alternativ ein maximal zulässiger Massenstrom von 1,8 kg/h) einzuhalten sein. Die Anwendung der 17. BImschV mit ihrem Grenzwert von 50 mg/Nm^3_{tr} aber würde wiederum zur Überschreitung führen.

Als Fazit festzuhalten bleibt auf jeden Fall: Ohne eine Abgasreinigungsanlage mindestens für Chlorwasserstoff ist eine Verbrennungsanlage mit den Maispellets der BioLog-Aufbereitungskette nicht zulässig. Die Abreicherung an bestimmten Stoffen beim Schritt der Auspressung der Silage ist nicht ausreichend, um den Brennstoff ausreichend zu entfrachten. Da die Brennstoffanalysen für alle Silagen sehr ähnlich sind, ist die Schlussfolgerung auf Gras, Gerste und Roggen übertragbar.

Auch die Entstaubung ist zu beachten. Durch den gegenüber Holz vielfachen Anteil an Asche gelangt einiger Feststoff in den Abgasstrom. Der relative Messwert in einem ausgewählten konstanten Zeitraum ohne Kalkzugabe lag in der Versuchswoche bei ca. 370 mg/Nm^3_{tr} (11 % Bezugssauerstoff), wenn ein für ein andere Biomasse aufwändig ermittelter Korrekturfaktor der parallel durchzuführenden Kalibrierungsmessung verwendet wird. Die TA Luft lässt eine Konzentration an Gesamtstaub von 20 mg/Nm^3_{tr} (Einsatz von Holz) oder einen maximalen Massenstrom von 0,20 kg/h zu. Wird der Massenstrom unterschritten, ist eine Konzentration von 150 mg/Nm^3_{tr} zulässig. Eine Staubabscheidung ist somit in jedem Falle notwendig.

II.6 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Aufgabe des Teilvorhabens 6 war es, die Untersuchungen mit einem hohen Anwendungsbezug durchzuführen. Für die Verwertbarkeit ist in die beiden Teilgebiete der Vergasung und Verbrennung zu unterscheiden.

Vergasung

Wesentliches Ergebnis der Vergasungsversuche mit allen untersuchten Pellets aus den Halmgütern ist, dass die Vergasung im Dauerbetrieb technisch machbar ist. Der Nachweis erfolgte über Versuchswochen von ca 100 h Laufzeit pro Woche. Bestimmte verfahrenstechnische Parameter müssen eingehalten werden. Zu nennen sind die Zugabe von Branntkalk zur Heraufsetzung des Ascheschmelzpunktes und die Einhaltung einer maximalen Reaktortemperatur von ca 830 ℃. Heißere Stellen stellen G efahrenpunkte für Anbackungen dar, kalte Stellen mit Dampfzufuhr führen zur Gefahr der Kondensation von harten Kalkverbindungen.

Der Pelletdurchmesser oder die Häcksellänge beeinflußten die Versuchsergebnisse nicht.

Das thermische Verhalten der Asche wird signifikant durch den Gehalt an Alkali beeinflußt. Aus Sicht des Anlagenbetreibers ist eine Minimierung wünschenswert.

Für die verschiedenen potenziellen Anwender wurden interessante Ergebnisse zur Betriebsführung herausgearbeitet. So kann es für die Strom- und Wärmeerzeugung im Gasmotor sinnvoll sein, auf einem Reaktor-Temperaturniveau von 750 bis 800 ℃ zu arbeiten, um ein heizwertreiches Gas zu bekommen. Notwendig ist eine gute Teerabscheidung auf der Gasreinigungsstrecke und die Rezirkulation des Materials zurück in den Reaktor. Für die BtL-Herstellung dagegen ist der Temperaturbereich von 800 bis 830 ℃ zu empfehlen, um das H_2:CO-Verhältnis zu maximieren. Unterstützend dazu wirkt der zugegebene Dampfstrom. Ungenügend aber für eine kommerzielle Anwendung ist der niedrige Kaltgaswirkungsgrad. Für diesen Punkt sind Entwicklungsarbeiten notwendig, um den Wert signifikant zu erhöhen.

Verbrennung

Die Verbrennung auf dem Rückschubrost gestaltete sich sehr schwierig. Die Zugabe von Kalkstein oder Kalkhydrat zur Heraufsetzung des Ascheschmelzpunktes führte im Naßentschlacker zu zähen Calziumverbindungen, welche den Austrag der Asche sehr erschwerten. Technisch denkbar wäre der Einsatz einer Trockenentaschung. Bei dieser aber muß auf den Abschluß des Feuerraums durch ein Wasserschloß verzichtet werden. Daher ist diese technische Lösung bei herkömlichen Festbrennstoffen nicht sehr verbreitet.

Die im Brennstoff enthaltenen Elemente gehen während der Verbrennung zu einen hohen Anteil in die Gasphase über. So ist Chlor als HCl und Schwefel als SO_2 nachzuweisen. Die HCl-Werte liegen, soweit ein maximaler Stoffstrom von 0,15 kg/h nicht eingehalten kann, oberhalb der Werte der TA Luft und der 17. BImSchV. Beim Schwefel stellen die kurzzeitigen Spitzen ein genehmigungsrechtliches Problem dar. Vom Tagesmittelwert her besteht eine gute Chance, die Vorgaben der TA Luft einzuhalten. Bei der 17. BImschV aber ist eine Reinigungseinrichtung erforderlich.

Ohne eine Reinigungseinrichtung dürfte die Verbrennung also nur in sehr kleinen Verbrennungseinrichtungen erfolgen, um die Frachtwerte auszunutzen. Bei größeren Einheiten ist eine Abgasreinigung mindestens für HCl vorzusehen. Die Reinigungseinrichtung ist für Staub in jedem Fall erforderlich.

II.7 Druckvergasung

II.7.1 Einleitung

Die Vergasungstechnologie ist eine alte Technologie, die in den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts ihren Aufschwung nahm. Vorläufer der heutigen modernen Vergasungsverfahren sind der Lurgi-Festbettvergaser (1926), der Winkler-Wirbelschichtvergaser (1926) und das Flugstromverfahren nach Koppers-Trotzek (1952) [7]. In den folgenden Jahrzehnten wurden auf dem Gebiet der Vergasungstechnik nur wenige Fortschritte erzielt. Während des Zweiten Weltkrieges wurden angesichts der Brennstoffknappheit, trotz erheblicher technischer Probleme, Holzvergaser für den Nutzfahrzeugbereich eingesetzt. Durch die Ölkrise in den 70er Jahren gewann die Kohlevergasung mit dem Ziel der Herstellung von flüssigen und gasförmigen Kraftstoffen erneut an Bedeutung. Lurgi entwickelte zusammen mit British-Gas den BGL-Vergaser. Koppers und Shell entwickelten 1980 ein Flugstromverfahren unter Druck. 1986 folgte eine Druckversion des Koppers-Trotzek-Verfahrens (Prenflow). Rheinbraun brachte den **H**och**t**emperatur-**W**inkler-Vergaser (HTW) zur Anwendungsreife. In den letzten 15 Jahren erlebt die Vergasungstechnologie eine erneute Renaissance. Die derzeitigen F&E-Aktivitäten konzentrieren sich v.a. auf IGCC-Anlagen (**I**ntegrated **G**asification **C**ombined **C**ycle), Gas- und Dampfturbinenprozesse (Kombiprozesse) mit integrierter Druckkohlevergasung und CO_2-Abtrennung sowie Polygenerationsanlagen zur Produktion von Strom, Wärme und synthetischen Kraftstoffen (FT-Kraftstoffe, Methanol, SNG etc.). Da die meisten an die Vergasung anschließenden Prozessschritte bei erhöhten Drücken ablaufen (FT-Synthese: 20-40 bar, Kombiprozesse: 20-40 bar, SNG: 1-60 bar, Ammoniak-Synthese: 130 bar) kann es zweckmäßig sein, bereits die Vergasung in einem druckaufgeladenen Apparat zu betreiben.

II.7.2 Theorie der Druckvergasung

Bei der thermochemischen Konversion von Kohle/Biomasse findet zunächst eine Entgasung (Pyrolyse) unter Bildung von CO, H_2, CH_4, CO_2, H_2O, $C_xH_yO_z$ statt; zurück bleibt ein fester Pyrolyserückstand. In der Folge reagieren die bei der Pyrolyse gebildeten Gase und das Vergasungsmittel mit dem Pyrolysekoks. Die wichtigsten heterogenen Gas/Feststoffreaktionen sind:

$C + CO_2 \leftrightarrow 2\ CO$	ΔH= +172 MJ/kmol	Boudouard-Reaktion (1)
$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	ΔH= +131 MJ/kmol	heterogene Wassergasreaktion (2)
$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$	ΔH= -75 MJ/kmol	hydrierende Vergasung (3)

Die Abhängigkeit der Umsetzungsreaktionen von Druck und Temperatur ist aus **Abb. II.7.2-1** ersichtlich.

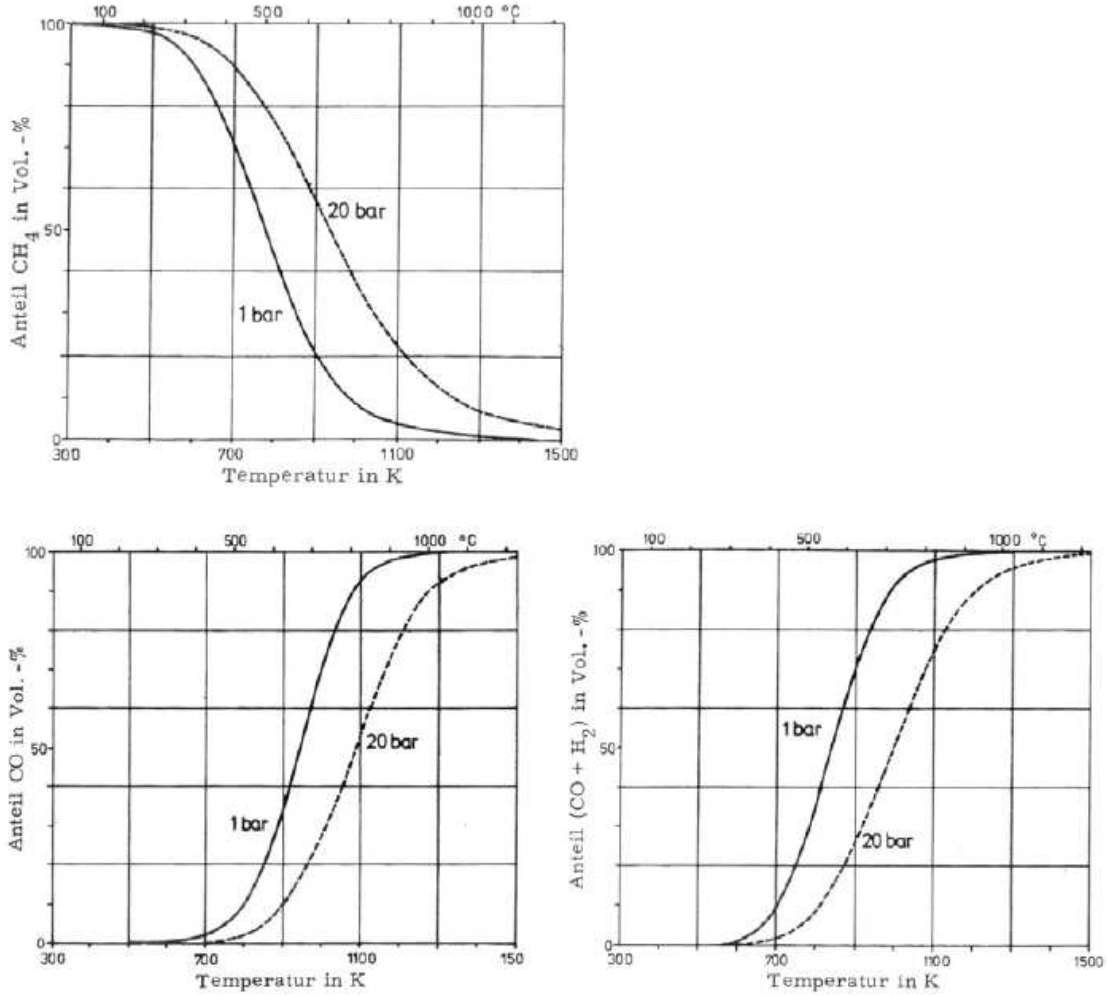


Abb. II.7.2-1: Druck- und Temperaturabhängigkeit der heterogenen Vergasungsgleichgewichte *(oben: hydrierende Vergasung, unten links: Boudouard- Reaktion, unten rechts: heterogene Wassergas-Reaktion)*

Das Methanisierungs-Gleichgewicht (3) verschiebt sich mit steigender Temperatur nach links, während sich die Boudouard (1) - und die heterogene Wassergasreaktion (2) mit zunehmender Temperatur auf die rechte Seite verschieben. Bei höheren Temperaturen entstehen mehr CO und H_2, der Anteil an CH_4 wird geringer. Bei Temperaturen über 1000 ℃ werde n außerdem Teere gecrackt und somit deren Konzentration im Rohgas gemindert. Genau umgekehrt liegen die Verhältnisse beim Druck. Mit steigendem Druck nimmt die Ausbeute an CO und H_2 ab, während die Methankonzentration zunimmt. Die erhöhte Methankonzentration führt zu einem, im Vergleich zur Vergasung bei Atmosphärendruck, höheren Heizwert [7].

II.7.3 Problem-Diskussion

II.7.3.1 Allgemeines

Neben einem höheren Heizwert liegen weitere Vorteile der Druckvergasung in der Einsparung an Kompressionsenergie (geringerer elektrischer Eigenverbrauch) sowie kleineren Reaktorvolumina und somit geringeren Investitionskosten.

Die Druckvergasung ist jedoch mit einem erhöhten technischen Aufwand für den Materialeintrag verbunden. Die Problematik beim Eintrag von Biomasse im Vergleich zu Kohle liegt begründet in der komprimierbaren Form sowie der wechselnden Beschaffenheit und Homogenität des Einsatzmaterials. Prinzipiell kann der Eintrag von Biomasse in einen druckaufgeladenen Vergasungsreaktor gemäß den Erfahrungen aus der Kohletechnologie diskontinuierlich (über Schleusensysteme), quasikontinuierlich (Schleusen-Pumpen-Systeme) oder kontinuierlich (Pumpen) erfolgen. Weitere Nachteile ergeben sich bei druckaufgeladenen Apparaten durch die höheren Anforderungen an die Sicherheitstechnik und durch die zusätzliche Materialbelastung des Zersetzungsreaktors. Unabhängig vom Druck kann es aufgrund von zu hohen Temperaturen bei Biomasse zur Versinterung der Asche kommen, was zu Problemen beim Ascheaustrag führen kann, sowie zu einem Zusammenbrechen der gesamten Wirbelschicht.

II.7.3.2 Eintrag von Biomasse in druckaufgeladene Reaktoren

Besondere Aufmerksamkeit muss bei druckaufgeladenen Apparaten dem Eintrag der Biomasse in den Reaktor gewidmet werden. Durch geeignete Vorrichtungen (Absperrklappen, Schleusen) muss verhindert werden, dass die Gase aus dem Vergasungsreaktor austreten können. Es besteht die Möglichkeit den Brennstoff über Zellenradschleusen beispielsweise in Wirbelschichtvergasungsreaktoren einzubringen [8] oder, wie bei der Anlage in Värnamo, aus einem bereits unter Druck stehenden Lagersilo über eine Förderschnecke. Weitere Möglichkeiten des Brennstoffeintrags lassen sich der Patentrecherche entnehmen.

II.7.3.3 Diskussion der Druck- und Temperaturabhängigkeit im Hinblick auf die Produktion von Strom und FT-Kraftstoffen

Für die Fischer Tropsch-Synthese hat eine vorgeschaltete Druckvergasung den Vorteil, dass Kompressionsenergie eingespart werden kann, da nicht der gesamte Produktgasvolumenstrom, sondern nur der vergleichsweise geringe Vergasungsmittelvolumenstrom komprimiert werden muss. Von Nachteil sind die erhöhten CH_4- und CO_2-Gehalte, da diese Ballastgase für die FT-Synthese darstellen. Außerdem nimmt die Ausbeute an H_2 und CO mit zunehmendem Druck ab. Um die genannten Nachteile auszugleichen, empfiehlt sich eine CO-Shift mit anschließender Abtrennung von CO_2 aus dem Produktgasstrom [9].

Um die Ausbeute an H_2 und CO zu steigern, sind bei der Druckvergasung höhere Temperaturen (> 900 ℃) als bei der atmosphärischen Vergasung erforderlich. Hofbauer et al. [10] führten eine Studie zur gekoppelten Produktion von Strom, Wärme und Kraftstoffen in sog. Polygenerationsanlagen für verschiedene Anlagenkonzepte (thermische Kraftwerksleistung jeweils 30 MW) durch. Demnach wird der höchste Netto-Gesamtwirkungsgrad (thermischer + kraftstoffbezogener + elektrischer Wirkungsgrad) bei der Luft-Druckvergasung erreicht. Der Kraftstoff-Wirkungsgrad ist dagegen bei der atmosphärischen Dampfvergasung am höchsten. Die Autoren der Studie kommen zu dem Ergebnis, dass eine Luft-Druckvergasung auf Grund des geringeren elektrischen Eigenenergieverbrauches für die Stromproduktion grundsätzlich

günstig ist, jedoch bestehen Nachteile für die Kraftstoffproduktion. Sie schlagen deshalb vor, die Dampfvergasung in Richtung einer druckaufgeladenen Dampfvergasung weiterzuentwickeln. Es sei zu erwarten, dass die Summe aus elektrischem und kraftstoffbezogenem Wirkungsgrad bei der Dampf- und Luft-Druckvergasung in etwa ähnlich hoch sein wird, dass die Dampfvergasung jedoch höhere Kraftstoffausbeuten und damit die bei weitem größere Flexibilität aufweist.

Als Beitrag zur Entwicklung der HTW-Wirbelschicht-Druckvergasung führte Hegermann [11] Untersuchungen zur Kinetik der Druckvergasung rheinischer Braunkohle durch. Voruntersuchungen zum Pyrolyseverhalten von Braunkohle bei Temperaturen von 750 – 900 °C in einem Laborwirbelschichtreaktor mit Argon als Trägergas zeigten, dass durch eine Erhöhung des Druckes die Ausbeuten an Teer vermindert werden. Der verminderte Teergehalt geht mit einer erhöhten Gasausbeute einher. Die Vergasung rheinischer Braunkohle in Wasserdampf wurde ebenfalls bei Temperaturen von 750 – 900 °C und Drücken von 2 bis 25 bar durchgeführt. Es zeigte sich, dass eine Erhöhung des Druckes bis 10 bar zunächst eine Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit der Wasserdampfvergasung bewirkt. Bei weiterer Erhöhung des Druckes bis 25 bar nimmt die Reaktionsgeschwindigkeit hingegen drastisch ab. Der negative Einfluss des Druckes auf die Reaktionsgeschwindigkeit kann jedoch unter den realen Bedingungen der HTW5 Vergasung (25 bar, autotherme Vergasung) durch die Verwendung von Sauerstoff als Vergasungsmittel kompensiert werden. Die Ergebnisse thermodynamischer Berechnungen, wonach mit zunehmendem Druck die CO_2- und CH_4-Ausbeuten zunehmen, bei gleichzeitiger Abnahme der CO- und H_2-Ausbeuten, konnten durch die experimentellen Arbeiten von Hegermann [11] bestätigt werden. Er konnte ferner zeigen, dass die Methanausbeute nahezu unabhängig ist von der Vergasungstemperatur. Demnach entsteht Methan offenbar hauptsächlich während der Pyrolyse.

II.7.4 Bestehende Anlagen: Druckvergasung – Kohle

II.7.4.1 Übersicht

Die Druckvergasung von Kohle ist ein bekannter Prozess und wird in folgenden Anlagen seit dem Zeitraum 1994-1996 betrieben [12]:

Tab. II.7.4.1-1: IGCC-Kohlekraftwerke

IGCC-Kraftwerk	**Buggenum**	**Wabash-River**	**Tampa**	**Puertollano**	**Vresova**
Standort	Niederlande	USA	USA	Spanien	Tschechien
Inbetriebnahme	1994	1995	1996	1998	1996
El. Leistung	253 MW	262 MW	250 MW	300 MW	351 MW
Brennstoff	Steinkohle + Biomasse	Steinkohle + Petrolkoks	Steinkohle	Steinkohle + Petrolkoks	Braunkohle
Vergasertyp	Shell-Flugstromdruck-vergaser	ConocoPhillips (E-Gas)	Texaco-Flugstrom-druckvergaser	Flugstrom-druckvergaser (Prenflow)	Sasol-Lurgi+ GSP
Nettowirkungs-grad	43 %	39 %	41 %	42 %	44 %

Bei den Anlagen handelt es sich um IGCC-Kraftwerke der zweiten Generation, bei denen eine Kohledruckvergasung in den konventionellen Kombiprozess aus **G**as- **u**nd **D**ampfturbinen-Prozess (GuD) integriert wird. Dadurch kann die Effizienz gegenüber herkömmlichen Kraftwerken deutlich erhöht werden. Die heißen Abgase der Gasturbinen werden in einem Abhitze-Dampfkessel zur Erzeugung von Wasserdampf verwendet. Der Dampf wird anschließend über einen herkömmlichen Dampfturbinenprozess entspannt. Es entfallen ca. 2/3 der elektrischen Leistung auf die Gasturbine und 1/3 auf den Dampfprozess. Bei erdgasbetriebenen Kombikraftwerken lassen sich Wirkungsgrade von bis zu 60 % erreichen. Bei mit Biomasse betriebenen Kombikraftwerken geht man von Wirkungsgraden von 45 % aus.

II.7.4.2 Hürth-Berrenrath – Druckaufgeladene HTW-Vergasung

In Hürth-Berrenrath war eine Vergasungsanlage der RWE von 1980–1997 im Demonstrationsbetrieb, die jeden Tag 720 Tonnen Braunkohle mittels HTW-Vergasung unter Druck in Synthesegas umwandelt. Jährlich entstanden auf diese Weise rund 300 Millionen Kubikmeter Synthesegas, aus dem großtechnisch Methanol gewonnen wurde [13].

Daten:

- Brennstoffleistung: 140 MW_{th}
- Vergasungsdruck: 10-25 bar
- Vergasungstemperatur: 950-1000 ℃
- Vergasungsmittel: Dampf, / O_2
- Brennstoff: Braunkohle (Torf, Biomassen)

II.7.5 Bestehende Anlagen – Druckvergasung – Biomasse

II.7.5.1 Värnamo – Druckaufgeladene zirkulierende Wirbelschicht

Die Anlage in Värnamo (Schweden) ist die erste biomassebasierte IGCC-Anlage (Demonstrationsbetrieb 1996-2000) [8].

Der Eintrag der Biomasse erfolgt zusammen mit dem Bettmaterial aus einem Druckbunker über eine Förderschnecke in den Vergasungsreaktor, eine druckaufgeladene zirkulierende Wirbelschicht. Die anfallende Asche wird gekühlt über das Ascheaustragssystem des Reaktors durch eine Druckschleuse ausgetragen. Das Rohgas durchläuft zunächst einen Zyklon zur Abscheidung des mitgetragenen Bettmaterials und anschließend eine zweistufige Kühlung zur Erzeugung von Sattdampf (350-400 ℃). Die Entstaubung erfolgt in einem Heißgasfilter, bestehend aus mehreren metallischen Filterelementen. Anschließend wird das Gas einer Gasturbine zugeführt. Die Restwärme des Turbinengases wird in einer Abhitzestrecke zur Dampferzeugung für eine Dampfturbine genutzt und anschließend in einen Kamin eingeleitet. Das Produktgas wird im nachfolgenden Prozess nicht unter den Taupunkt der Teerkomponenten abgekühlt, so dass die Teere problemlos in der Gasturbine verbrannt werden können (s. **Abb. II.7.5.1-1**)

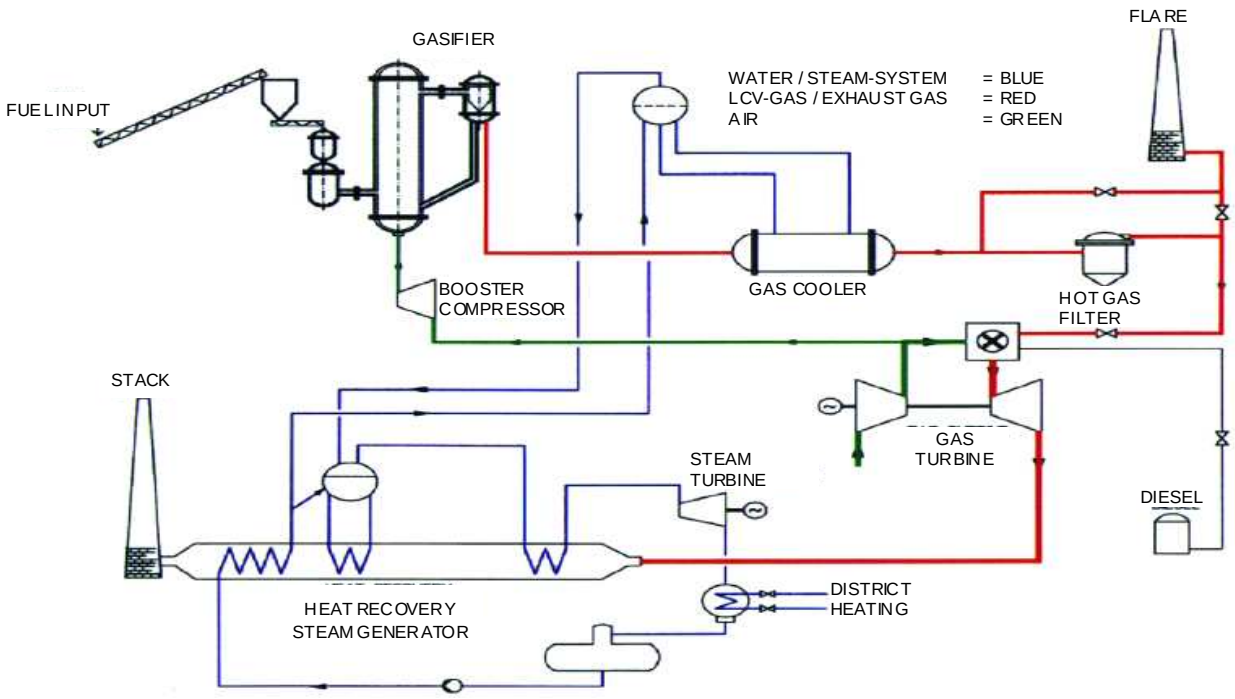


Abb. II.7.5.1-1: Anlagenschema Värnamo

Daten [14]:

- Thermische Leistung: 9 MW_{th}
- Elektrische Leitung: 6 MW_{el}
- Brennstoffleistung: 18 MW_{th}
- Vergasungstemperatur: 950–1000 ℃
- Vergasungsdruck: 18 bar (g)
- Vergasungsmittel: Luft
- Brennstoff: Holzhackschnitzel, etc.

II.7.6 Aktuelle F&E-Arbeiten / Entwicklungsaktivitäten

II.7.6.1 Schwarze Pumpe (FZK): Flugstrom-Druckvergaser

Diverse flüssige Einsatzstoffe wurden bis 2007 im **S**ekundärrohstoff-**V**erwertungs**z**entrum (SVZ) Schwarze Pumpe in einem Flugstrom-Druckvergaser vergast [15]. Vorgeschaltet wurde durch Pyrolyse (Verflüssigung unter Luftausschluss) die Herstellung von Pyrolyseöl und –koks, welche vermischt wurden zu einem Öl/Koks-Slurry. Dieser Slurry wurde anschließend in dem Flugstrom-Druckvergaser umgesetzt. Charakteristikum des Apparates ist der innere Kühlschirm in einem kühleren Druckmantel aus Stahl, der den Einsatz von Brennstoffen mit den unterschiedlichsten Aschegehalten und -qualitäten erlaubt. Der an der Innenwand entstehende Schlackebelag schützt die heiße Vergaserwand vor Korrosion. Die Slurries werden mit einem konstant geregelten Fluss durch eine Exzenterschneckenpumpe in den Vergaser dosiert und dort mit reinem Drucksauerstoff in einem speziellen Brennerkopf pneumatisch zerstäubt. Die Ergebnisse von vier Versuchskampagnen an einem GSP-Pilotvergaser der Fa. Future Energie in Freiberg haben gezeigt, dass sich bei hohen Drücken (50 bis 100 bar) oberhalb des Synthesedruckes und hohen Temperaturen um 1200 °C ein teerfreies Gas erzeugen lässt. Nach einer zeitweisen Stilllegung wird die Anlage inzwischen großteils mit Braunkohle betrieben und erzeugt Synthesegas für die Methanolherstellung [12].

Parallel laufen an einer Pilotanlage in Freiberg (5 MW_{th}, 1200-1600 °C, 26 bar) zur Flugstrom-Druckvergasung weitere Versuchkampagnen des Forschungszentrums Karlsruhe (s. **Abb. II.7.6.1-1**). Grundgedanke der Entwicklung ist eine dezentrale Verflüssigung der Biomasse und Vermischung mit dem entstehenden Koks zu Slurry. Dieser Slurry soll dann zentral in einer großen Vergasungsanlage weiterverarbeitet werden (bioliq-Verfahren).

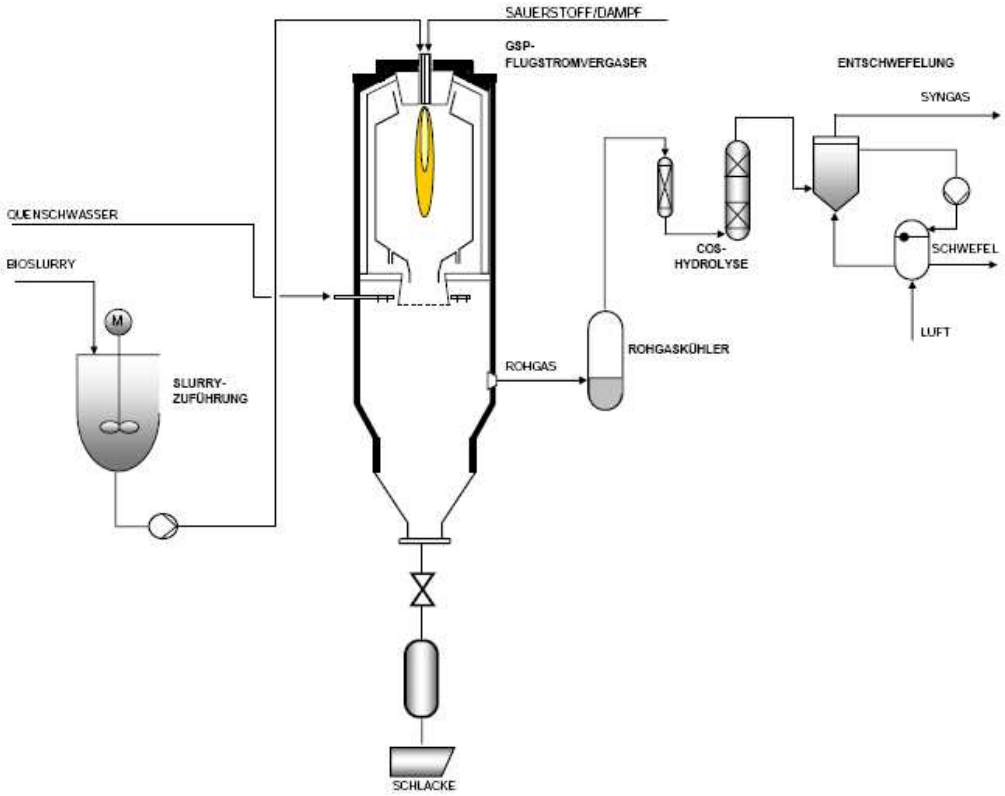


Abb. II.7.6.1-1: GSP-Flugstrom-Druckvergasung mit Gasaufbereitung [16]

Daten:

- Brennstoffleistung: 130 MW_{th}
- Vergasungstemperatur: 1200–1600 ℃
- Vergasungsdruck: 25-30 bar
- Vergasungsmittel: Dampf / O_2
- Brennstoff: Kohle, Komprimate heizwerter Abfälle, kontaminiertes Holz als Co-Brennstoff

Des Weiteren wurden im SVZ feste Abfälle in einer Festbettvergasung unter Druck umgesetzt. Dabei wurden die Abfälle im Gemisch mit Kohle über Schleusensysteme in den Reaktor eingetragen und die nicht vergasbaren Rückstände in Form von Schlacke aus dem Reaktor entfernt.

Daten:

- Vergasungstemperatur: 800–1300 ℃
- Vergasungsdruck: 25 bar
- Vergasungsmittel: Dampf / O_2
- Brennstoff: Abfälle, Kohle

II.7.6.2 IGCC-CCS Kohlekraftwerk mit CO_2-Abtrennung und Speicherung

Im Rahmen des europäischen Gemeinschaftsprojekts „Enhanced Capture of CO_2“ (ENCAP) plant RWE die Inbetriebnahme eines IGCC-CCS Kohlekraftwerkes mit CO_2-Abtrennung und anschließender Speicherung für 2014 [17]. Zu diesem Zweck wird die Kohle zunächst in einem Flugstromvergaser bei hohen Temperaturen und unter einem Druck von circa 35 bar in ein brennbares Rohgas umgewandelt. Anschließend an die Gasreinigung soll dann das zu CO_2 umgewandelte Kohlenmonoxid abgetrennt und dauerhaft gespeichert werden. Der verbleibende Wasserstoff wird einer Gasturbine zugeführt, die entstehenden heißen Abgase bestehen im Wesentlichen aus Luftstickstoff und reinem Wasserdampf; sie werden zur Dampferzeugung genutzt. Der Dampf treibt dabei wiederum eine Dampfturbine und einen zweiten Generator zur Stromerzeugung an.

Daten:

- Brennstoffleistung: 450 MW_{th}
- Elektrische Leitung: 360 MW_{el} (netto)
- Vergasungstemperatur: 800–900 ℃
- Vergasungsdruck: 35 bar (g)
- Brennstoff: Kohle

II.7.6.3 Choren Carbo-V-Prozess – Flugstromvergasung

In Freiberg ist eine Demonstrationsanlage der Firma Choren in der Inbetriebnahme [12]. Das Carbo-V®-Verfahren zur Herstellung von Sundiesel ist ein dreistufiges Vergasungsverfahren mit den Teilprozessen Niedertemperaturvergasung, Hochtemperaturvergasung (druckaufgeladen) und endotherme Flugstromvergasung. Kleingehäckselte, getrocknete Biomasse wird im Niedertemperaturvergaser in Koks und teerhaltiges Schwelgas umgewandelt. Das Schwelgas wird in die Brennkammer des Carbo-V®-Vergasers geleitet und dort mit Sauerstoff und Wasserdampf teiloxidiert. Teere werden bei Temperaturen von ca. 1400 °C vorwiegend in H_2 und CO umgewandelt. Es entsteht ein teerfreies Gas. Durch Einblasen des zermahlenen Biokokses in das Gasgemisch unterhalb der Brennkammer entsteht ein heizwertreiches Rohgas (Vergasungsgas). Das 800 °C heiße Rohgas wird anschließend im Wärmetauscher weiter abgekühlt und Prozessdampf für die Strom und Heizdampferzeugung gewonnen. Im Entstauber wird der nicht umgesetzte Koks abgetrennt und zurück in den Carbo-V®-Vergaser geleitet. Bei der Durchströmung des Wäschers werden Schadstoffe wie Chlor und Schwefel ausgewaschen. Im Fischer-Tropsch-Reaktor werden aus dem verdichteten und gereinigten Rohgas mit Hilfe eines Cobalt-Katalysators kettenförmige Kohlenwasserstoffe gewonnen. Schließlich wird aus dem FT-Rohprodukt in einem mehrstufigen Aufbereitungsprozess der fertige Sundiesel gewonnen (s. **Abb. II.7.6.3-1**).

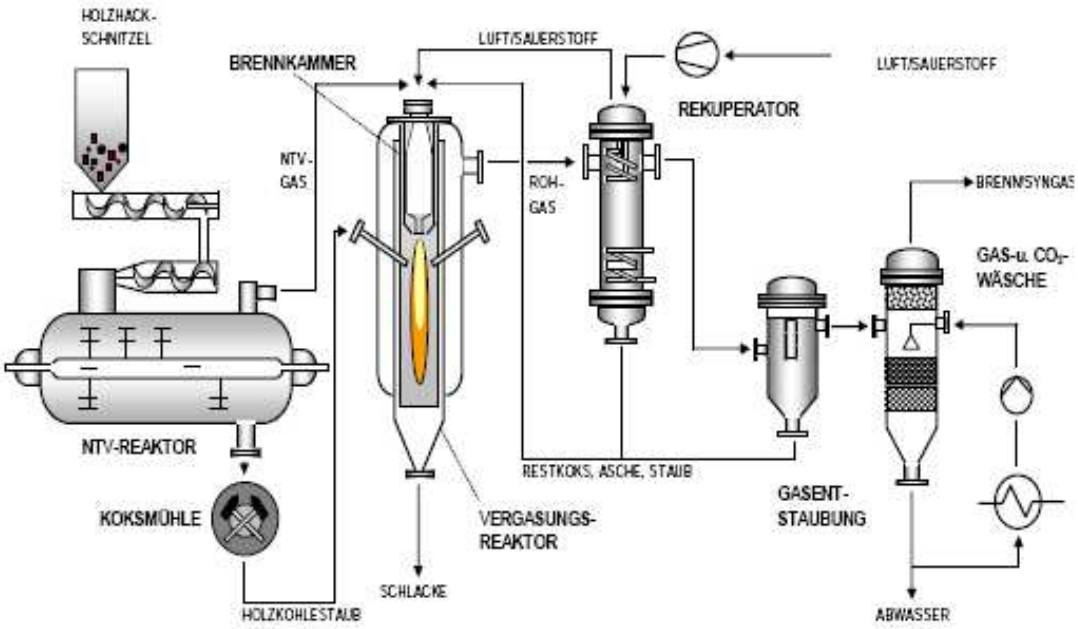


Abb. II.7.6.3-1: Carbo-V®-Prozess [16]

Daten Hochtemperaturvergasung:

- Brennstoffleistung: 50 MW_{th}
- Vergasungsdruck: 5 bar
- Vergasungstemperatur: 1500 °C

- Vergasungsmittel: Dampf / O_2
- Brennstoff: Holzhackschnitzel

II.7.6.4 Värnamo / VVBGC

Nach der erfolgreichen Beendigung des Demonstrationsbetriebes, wurde die Anlage zeitweise stillgelegt. Das **V**äxjö **V**ärnamo **B**iomass **G**asification **C**entre (VVBGC) wurde von Vertretern der Wirtschaft und Wissenschaft gebildet [18]. Nach Umbauten der Anlage soll diese reines wasserstoffreiches Synthesegas produzieren und für einen Zeitraum von 5 Jahren als Demonstrationsanlage dienen (s. **Abb. II.7.6.4-1**).

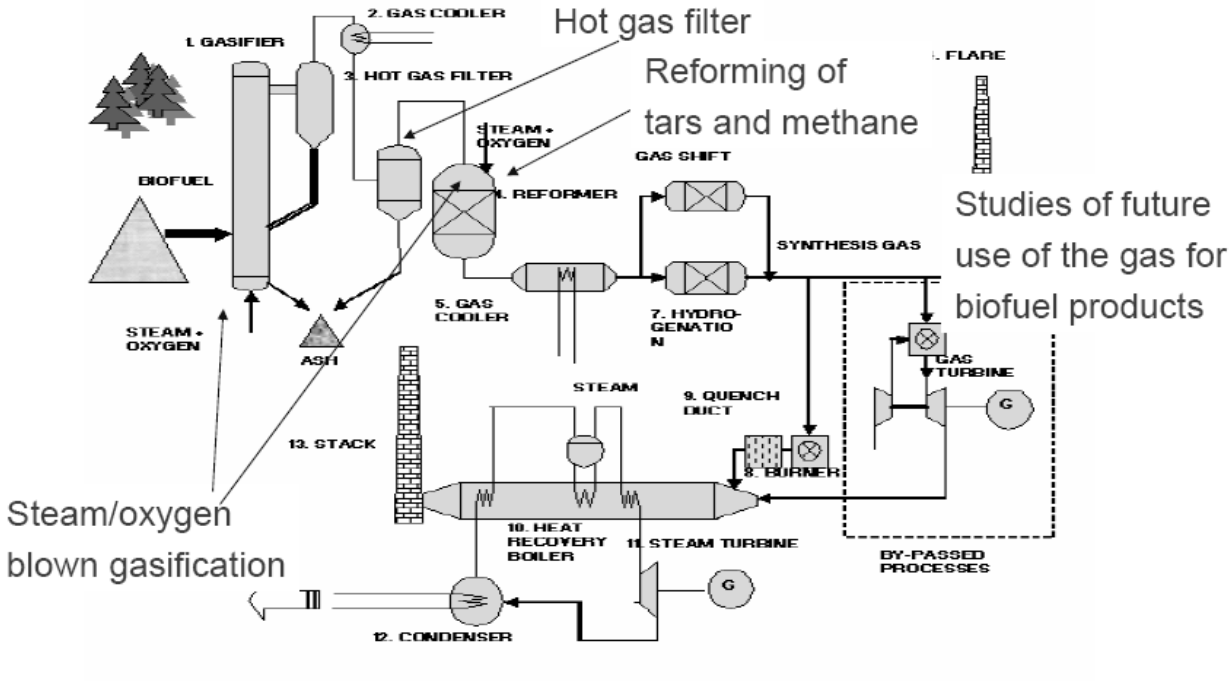


Abb. II.7.6.4-1: Värnamo [19]

Daten:

- Thermische Leistung: 9 MW_{th}
- Elektrische Leitung: 6 MW_{el}
- Brennstoffleistung: 18 MW_{th}
- Vergasungstemperatur: 950–1000 ℃
- Vergasungsdruck: 10-15 bar
- Vergasungsmittel: Dampf / O_2
- Brennstoff: Holzhackschnitzel, etc.

II.7.6.5 Das BtL-Projekt der TU Bergakademie Freiberg

Bei der TU Bergakademie Freiberg befindet sich eine Pilotanlage zur Wirbelschichtvergasung in der Planung, die Inbetriebnahme soll 2009 erfolgen. Das Vergaserkonzept („HTW plus“ /

PHTW-Power High Temperatur Winkler) besteht aus einer Kombination des Sasol-Lurgi Festbettvergasers und des HTW-Vergaser mit einer kompletten Staubrückführung des im Warmgasfilter abgeschiedenen Staubes in die Wirbelschicht [16,20]. Durch das Vergaserdesign wird die sich bildende Schlacke kontinuierlich am Reaktorboden schmelzflüssig abgezogen, in einem Wasserbad gekühlt und als kohlenstofffreies glasiertes Granulat ausgetragen. Durch die Geometrie des Vergasers werden hohe Verweilzeiten realisiert, was zum Abbau von Teeren führt (s. **Abb. II.7.6.5-1**).

Das erzeugte Synthesegas dient der Methanolerzeugung.

Daten:

- Brennstoffleistung: 10 MW_{th}
- Vergasungstemperatur: 900–950 ℃
- Vergasungsdruck: 25 bar
- Vergasungsmittel: Sauerstoff, Dampf, CO_2
- Brennstoff: Biomasse als Pellets und Holzhackschnitzel

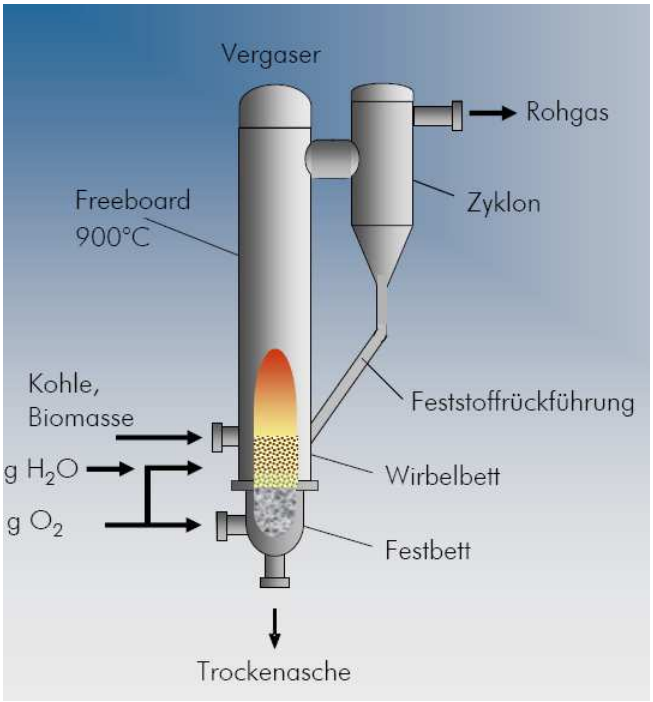


Abb. II.7.6.5-1: HTW-Plus / PHTW - Vergaser der TU Bergakademie Freiberg

II.7.6.6 Biomass Heatpipe Reformer

Im Rahmen des EU-Projektes BioHPR an der TU München wurden drei Versuchsanlagen in Betrieb genommen. Ziel ist es, in den nächsten Monaten eine semikommerzielle Demonstrationsanlage in Betrieb zu nehmen, mit der ein Dauerbetrieb und der Betrieb ohne Beaufsichtigung unter kommerziellen Randbedingungen getestet werden kann.

Bei der BioHPR-Technik handelt es sich um eine allotherme druckaufgeladene Vergasung [21]. Der Brennstoff wird über ein Schleusensystem in den eigentlichen Wirbelschichtvergaser, den Reformer eingetragen. Der zugeführte Brennstoff wird nicht vollständig vergast, ein Teil des Brennstoffes wird als Restkoks bzw. Holzkohle über ein Filtersystem nach unten in eine Wirbelschichtbrennkammer ausgetragen. Diese zweite Wirbelschicht wird mit Luft fluidisiert. Der Restkoks verbrennt in dieser Wirbelschicht bei Temperaturen um 900℃ und stellt so die Wärme bereit, die schließlich mit Heatpipes zurück in den Reformer übertragen wird. Heatpipes sind in sich geschlossene Rohre, die mit einem Arbeitsfluid gefüllt sind. Das Arbeitsfluid – beispielsweise Natrium oder Kalium - verdampft in der Heizzone und kondensiert in der Kühlzone des Wärmerohrs. Die dabei auftretenden Wärmeübergangskoeffizienten sind um Größenordnungen höher als bei rauchgasdurchströmten Rohren, so dass der Wärmeeintrag nur noch durch den Wärmeübergang von der Rohroberfläche in die Wirbelschicht limitiert wird. Der BioHPR findet derzeit nur im kleinen Leistungsbereich Anwendung.

Daten:

- Brennstoffleistung: 120 / 500 kW_{th}
- Vergasungsdruck: 5 bar
- Vergasungsmittel: Wasserdampf

II.7.6.7 Vergasung in überkritischem Wasser

Die Pilotanlage VERENA (Versuchsanlage zur energetischen Nutzung agrarwissenschaftlicher Stoffe) des Forschungszentrums Karlsruhe ist die erste kontinuierliche Anlage zur Biomassevergasung in überkritischem Wasser [22].

Das Potenzial des Prozesses liegt in der technischen Möglichkeit aus wasserreicher Restbiomasse mit guter energetischer Effizienz Wasserstoff bzw. Synthesegas zu produzieren. Die potenziellen Vorteile des Prozesses der Biomassevergasung in überkritischem Wasser lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- guter thermischer Wirkungsgrad auch bei wasserreichen Edukten
- hoher Umsatz
- hohe Wasserstoffausbeute
- sauberes Produktgas
- H_2-Hochdruckspeicher leicht realisierbar
- sehr geringe Kompressionsarbeit
- integrierte einfache CO_2-Abtrennung möglich
- hohe Raum-Zeit-Ausbeute.

Seit 2000 wird die Vergasung in überkritischem Wasser untersucht und entwickelt (**S**uper **C**ritical **W**ater **G**asification, SCWG). Ohne Zusatz von Sauerstoff reagieren dabei organische Substanzen mit überkritischem Wasser (T>374℃, p>22 1 bar). Kohlenstoff wird zu CO_2 oxidiert und Wasserstoff wird sowohl aus den organischen Substanzen als auch aus dem Wasser

freigesetzt. Der erste Testbetrieb der Anlage Verena begann Ende 2002. Als Biomasse wurden hauptsächlich Methanollösungen eingesetzt (s. **Abb. II.7.6.7-1**).

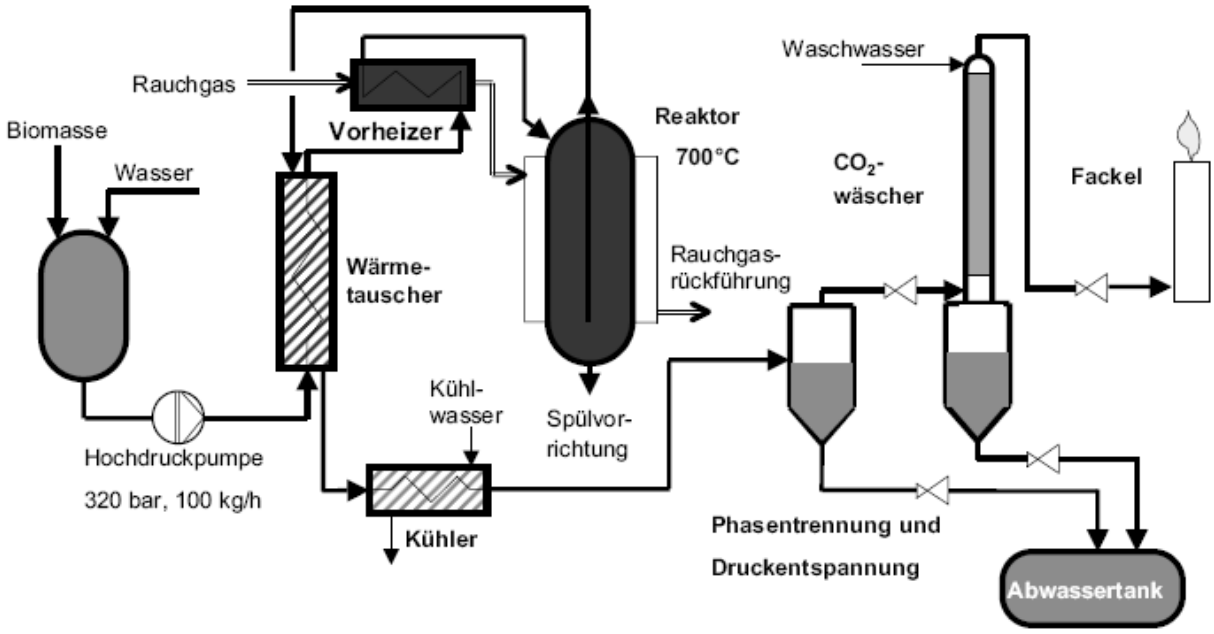


Abb. II.7.6.7-1: Vereinfachtes Prozessschema der Pilotanlage Verena [10]

Als wesentliche Ergebnisse des Testbetriebes lassen sich folgende Punkte nennen:

- Es wurde ein wasserstoffreiches (bis über 80 Vol.%) Produktgas erzeugt.
- Der thermische Wirkungsgrad des Hauptwärmetauschers lag bei etwa 80%.
- Der Methanolumsatz betrug >90%.
- Der Betrieb verlief ohne Störungen. Die Anlage war problemlos bedienbar.

Daten:

- Brennstoffdurchsatz: 100 kg/h
- Brennstoffleistung: 0,1 MW_{th}
- Vergasungstemperatur: 600-700 ℃
- Vergasungsdruck: 250- 350 bar
- Brennstoff: zerkleinerte Biomasse (Slurry), Methanollösung

II.7.7 Patentrecherche: Vergasung / Verbrennung

II.7.7.1 Vorbemerkung

Angesichts der sehr großen Zahl von existierenden Patenten im Bereich der Druckvergasung von Kohle und / oder Biomasse sollen im Folgenden einige wenige, ausgewählte Verfahren näher vorgestellt werden. Im Mittelpunkt steht dabei der Materialeintrag in Druckvergasungs-Reaktoren, die auch für Biomassen wie z.B. Holz oder Stroh geeignet sind. Eine Liste der Patente befindet sich im Anhang.

II.7.7.2 Druckaufgeladene Vergaserapparate

Eintrag von Kohle in druckaufgeladene Apparate

Das vom Batelle-Institut e.V. im Jahr 1976 vorgeschlagene Verfahren zum Eintrag von Kohle in druckaufgeladene Vergaserapparate sieht die Verwendung einer Kniehebel-Stempelpresse, wie sie seit mehr als 100 Jahren zum Brikettieren von Braunkohle verwendet wird, vor (Offenlegungsschrift **DE 24 36 531** [P 1]).

Wirbelschichtverfahren

Das internationale Patent WO 01/10980 A1 [P 2] bezieht sich auf ein Verfahren zur Einbringung von kohlenstoffhaltigem Einsatzgut (Stückgrößen bis 100 mm, Feuchtegehalt: 0-50 % bezogen auf die Trockenmasse, Hohlraumanteil von mindestens 30 %) wie z.B. Shredder-Leichtgut der Altautoverwertung, Kunststoffabfälle, zerkleinerte Altreifen, entwässerte Klärschlämme, Braun- und Steinkohle, zerkleinerter Hausmüll, zerkleinerte Holzabfälle und Stroh in einen Behandlungsraum, vorzugsweise einen Druckvergasungsreaktor nach dem Prinzip des Hochtemperatur-Winkler-Verfahrens (HTW).

Üblicherweise werden zum Eintrag von Brennstoffen in unter Überdruck stehende Reaktoren Fallrohre, Eintragsschnecken oder pneumatisch betriebene Eintragsorgane verwendet. Dies begründet sich dadurch, dass historisch vorwiegend Kohle als Einsatzstoff für die Druck-vergasung verwendet wurde, für die die in atmosphärisch betriebenen Feuerungsanlagen bewährten Eintragssysteme in leicht modifizierter Form übernommen wurden. Bei den oben genannten Einsatzstoffen treten dabei folgende Probleme auf:

- geringere Kohlenstoffgehalte und geringere Heizwerte als bei Kohle
- großer Energieaufwand für die Zerkleinerung bis zu einer Maximalkorngröße von 2 bis 6 mm
- Transport- und Fördereigenschaften der Schüttung werden erheblich verschlechtert, wenn bei der Zerkleinerung Formen erzeugt werden, die von der Idealform der Kugel abweichen.

Um die genannten Probleme zu umgehen, kommt ein zweistufiges Verfahrenskonzept zur Anwendung. In einer ersten Verfahrensstufe wird das Einsatzgut in einen gas- und / oder druck-dichten Füllraum hineingegeben, mit Bespannungsgas unter Druck gesetzt und dabei förderbar gehalten. In einer zweiten Verfahrensstufe wird das unter Druck stehende Einsatzgut homoge-nisiert und portioniert in den Druckvergasungsraum befördert. In beiden Verfahrensschritten werden Konusmischer eingesetzt.

Ein weiteres Verfahren zur Einbringung von kohlenstoffhaltigem Einsatzgut (Stückgrößen bis 100 mm, Feuchtegehalt 0-50 % bezogen auf die Trockenmasse, Hohlraumanteil von

mindestens 30 %) wie z.B. Shredder-Leichtgut aus der Altautoverwertung, Kunststoffabfälle, zerkleinerte Altreifen, entwässerten Klärschlämme, Braun- und Steinkohle, zerkleinerter Hausmüll, zerkleinerte Holzabfälle und Stroh in einen Druckvergasungsreaktor wird im internationalen Patent **WO 01/10981 A1** [P 3] beschrieben. Die Erfindung bezieht sich auf ein dreistufiges Verfahren zur Einbringung von kohlenstoffhaltigen Einsatzstoffen in einen Behandlungraum, vorzugsweise einen Druckvergasungsreaktor nach dem Prinzip des Hochtemperatur-Winkler-Verfahrens.

Bei dem im Patent **DE 195 48 324 C2** [P 4] niedergelegten Verfahren handelt es sich um ein Verfahren zum Vergasen von kohlenstoffhaltigen Feststoffen mit gasförmigen, sauerstoffhaltigen Vergasungsmitteln in einem zylinderförmigen Wirbelschichtvergaser, der einen Reaktionsraum aufweist, dessen unterer Abschnitt die Form eines Kegelstumpfes hat, innerhalb dessen sich wenigstens der größere Teil der Wirbelschicht befindet (s. **Abb. II.7.7.2-1**). In den kegelförmigen Abschnitt werden das gasförmige Vergasungsmittel und gegebenenfalls die zu vergasenden Feststoffe sowie rückgeführte Feststoffe, die aus dem Reaktionsraum des Vergasers ausgetragen wurden, eingebracht. Die kohlenstoffhaltigen Feststoffe werden unter erhöhtem Druck im Wirbelbett vergast, wobei oberhalb des Wirbelbettes ein Nachvergasungsraum und unterhalb des Wirbelbettes ein Festbett aus Vergasungsrückständen vorhanden ist.

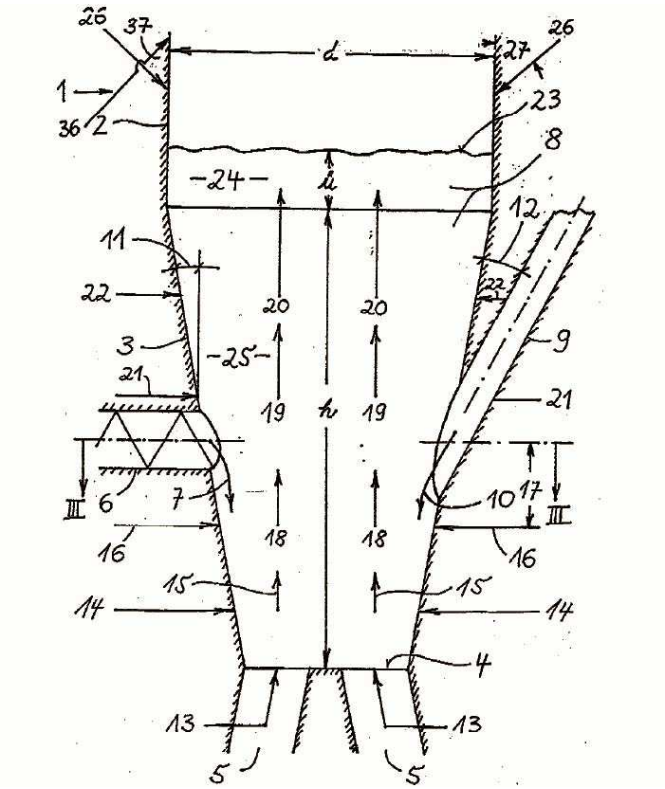


Abb. II.7.7.2-1: Längsschnitt HTW-Wirbelschichtvergaser *(Patent DE 195 48 324 C2 [P 4])*

Ein solcher Vergaser, der als Hoch-Temperatur-Winkler-Vergaser (HTW) ausgebildet sein kann, wird z.B. in Abhängigkeit von der Beschaffenheit der zu vergasenden Materialien bei einer Temperatur zwischen etwa 600 ℃ und 1300 ℃ und unt er einem Überdruck von bis zu 30 bar

betrieben. Als kohlenstoffhaltige Einsatzstoffe können Kohle (Braun- und/oder Stein-kohle), Biomasse, kohlenstoffhaltige Reststoffe, z.B. Klärschlämme und Kunststoffe eingesetzt werden.

Ein Verfahren zum Einblasen von Vergasungsmittel in beliebige druckaufgeladene Vergasungsräume, die partikelbeladene Gase enthalten und bei Überdrücken gegenüber Atmosphärendruck von > 10 bar betrieben werden, ist in Patent **DE 102 42 594 B4** [P 5] beschrieben. Durch möglichst hohe Einströmgeschwindigkeiten soll ein Stillstand des Vergasers durch Eindringen von Schlacke und kohlenstoffhaltigem Material in die Vergasungsmitteldüsen verhindert werden.

Flugstromverfahren

Vom Forschungszentrum Karlsruhe liegen mehrere Patente und Offenlegungsschriften zur Herstellung von Slurries und anschließender Druck-Flugstromvergasung vor.

In DE 101 51 054 A1 [P 6] wird beispielhaft ein Verfahren zur Behandlung von Biomasse beschrieben. Die Biomasse wird zunächst einer Schnellpyrolyse bei 400 bis 600 ℃ unterworfen, wobei sich Bioöl (40-80 Gew.-%) und Biokoks (10-30 Gew.-%) bilden. Durch Mischen des Bioöls mit dem Pyrolysekoks entsteht eine Mischung, die als Slurry (Ölschlamm) bezeichnet wird, welche anschließend in einem unter Überdruck betriebenen Flugstrom-Druckvergaser (mindestens 25 bar) bei 1200 bis 1800 ℃ mit reinem Sauerstoff unterstöchiometrisch in ein Rohgas überführt wird. Das genannte Verfahren weist jedoch einige entscheidende Nachteile auf, welche die Anwendung erschweren, erheblich einschränken oder besondere Vorkehrungen erforderlich machen. Das Zwischenprodukt, der Ölschlamm (Slurry) ist häufig nicht stabil und lagerfähig. Nach einer gewissen Zeit setzt sich der Pyrolysekoksanteil im Slurry ab und das Bioöl entmischt sich, wobei sich eine wässrige und eine organische Phase bilden. Gelangt die entmischte Phase, mit überwiegend wässrigem Anteil, zusammen mit dem Vergasungsmittel Sauerstoff in den Flugstromvergaser stellt sich ein Sauerstoffüberschuss ein, der in Folge einer Vermischung mit zuvor erzeugtem Synthesegas zur Explosion führen kann. Mittlerweile ist es gelungen, die genannten sicherheitstechnischen Probleme durch ein Verfahren zu lösen, bei dem die Pyrolysekokspartikel eine offene Porosität oberhalb von 50 % aufweisen und eine Zerkleinerung der Pyrolysekokspartikel vor der Einleitung in den Flugstrom-Druckvergaser stattfindet (**DE 10 2004 019 203 B3** [P 7]). Das Verfahren ist wesentlicher Bestandteil einer Verfahrenskette zur Erzeugung von synthetischen Treibstoffen und chemischen Grundstoffen aus Biomasse (bioliq-Verfahren des Forschungszentrums Karlsruhe).

Im Folgenden soll die Vergasung der Slurries im Druck-Flugstromreaktor näher betrachtet werden. In der Offenlegungsschrift **DE 10 2005 043 212 A1** [P 8] wird ein Verfahren zur Erzeugung von Synthesegasen durch Partialoxidation von aus aschehaltigen Brennstoffen hergestellten Slurries und Vollquenchung des Rohgases vorgestellt.

Brennstoffe wie Steinkohle, Steinkohle-, Braunkohle-, Biomassekoks und / oder Petrolkoks werden auf eine Körnung < 500 µm, vorzugsweise < 200 µm, zerkleinert und unter Zugabe von Flüssigkeiten wie Wasser oder Öl zu einer Brennstoff-Wasser- oder Brennstoff-Öl-Suspension vermischt. Bei Verwendung von Wasser als Trägermedium erreicht man unter Zusatz von Tensiden stabile Feststoffkonzentrationen bis 70 Gew.-%. Das dem Vergasungsreaktor zufließende Slurry wird gemeinsam mit dem zuströmenden Sauerstoffstrom im Vergasungsraum bei Drücken zwischen Umgebungsdruck und 100 bar sowie Temperaturen zwischen 1200

und 1900 ℃ einer partiellen Oxidation unterzogen. Der Vergasungsraum ist von einem Kühlschirm begrenzt, der aus einem gasdicht verschweißten, wassergekühlten Rohrsystem besteht. Das Rohgas strömt gemeinsam mit der flüssigen Schlacke über in einen Quenchkühler. Zur Einsparung von Frischwasser wird dazu meist Kondensat eingesetzt, das bei der Abkühlung des Rohgases in nachgeschalteten Anlagenteilen anfällt. Das gesättigte Rohgas besitzt eine Sättigungstemperatur von ca 180-260 ℃, abhängig vom Vergasungsdruck. Die Schlacke sammelt sich in einem Wasserbad im Unterteil des Quenchgefäßes und wird periodisch ausgeschleust. Zum Schutz des Druckmantels vor Erosion und Korrosion ist ein Verschleißmantel vorgesehen. Auf die anschließende Gasreinigung soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Einzelheiten sind in DE10 2005 043 212 A1 [P 8] nachzulesen.

In der Offenlegungsschrift **DE 10 2005 042 640 A1** [P 9] wird ein Verfahren zur Erzeugung von Synthesegasen durch Partialoxidation von aus aschehaltigen Brennstoffen hergestellten Slurries mit Teilquenche und Abhitzegewinnung vorgestellt.

II.9 Verwendete Unterlagen

II.9.1 Literaturstellen

[1] Brüggemann, C.: *Getreide und Stroh als Brennstoff*, Land&Forst 47, 18.11.2004, S. XVI +XVII.

[2] Ottmann, M.; Karl, J.; Hein, D.: *Standatisiertes Verfahren zur Bestimmung des thermischen Ascheverhaltens biogener Brennstoff*", 13. Symposium *Energie aus Biomasse-Biogas, Flüssigkraftstoffe, Festbrennstoffe*, Kloster Banz, 25+26.11.2004, ISBN 3-934681-35-2

[3] *RENEW - Renewable Fuels for Advanced Power Trains*, EU-Vorhaben, Contract No SES6-CT-2003-502705, 1.01.2004 bis 31.12.2007

[4] *Synthetische Kraftstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (ArtFuel)*; CUTEC-Institut GmbH im Auftrage des niedersächsischen Umweltministeriums (Hannover), Förderkennzeichen 17-32344/6/0/1/12-04032-5084 (2002), Mai 2005

[5] Gil, J.; Aznar, M.P.; Caballero, M.A.; Frances, E.; Corella, J.: *Biomass Gasification in Fluidized Bed at Pilot Scale with Steam-Oxygen Mixtures. Product Distribution for Very Different Operating Conditions*; Energy & Fuels, Vol. 11, No. 6, Nov/Dec 1997, S. 1109-1118.

[6] *Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft* – TA Luft vom 24. Juli 2002, Veröffentlicht in *Gemeinsames Ministerialblatt vom 30. Juli 2002 (GMBI.2002), Heft 25-29, S. 511-605*

[7] Higman, C., van der Burgt, M.: *Gasification*, Gulf Professional Publishing, 2003

[8] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.: Schriftenreihe *"Nachwachsende Rohstoffe" Band 29 – Analyse und Evaluierung der thermochemischen Vergasung von Biomasse*; Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster 2006

[9] Freiberger Forschungshefte A169, *Kolloquium Druckvergasung* am 13. November 1959 in Markkleeberg 1960, Akad.-Verlag, Berlin

[10] Hofbauer, H., Rauch, R., Fürnsinn, S., Aichernig, C.: *Energiezentrale Güssing – Energiezentrale zur Umwandlung von biogenen Roh- und Reststoffen einer Region in Wärme, Strom, BioSNG und flüssige Kraftstoffe***,** Berichte aus Energie- und Umweltforschung, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien 2006

[11] Hegermann, R.: *Kinetik der Druckvergasung rheinischer Braunkohle: ein Beitrag zur Entwicklung der Wirbelschichtdruckvergasung (HTW-Verfahren von Rheinbraun)*, Dissertation TU Karlsruhe, 1990

[12] Radig, W.: *Vergasung als Option der thermochemischen Nutzung von Biomasse;* in Terra Tec, Leipzig 2007

[13] TU Bergakademie Freiberg: *HTW Gasification Technology for BtL-Fuels - Synthetic Biofuels - Techniques, Potentials, Perspectives***,** 2nd International BtL-Congress, Berlin 2006

[14] Stahl, K., Neergaard, M., Nieminen, J.: *Progress Report: Varnamo Biomass Gasification Plant*; in Gasification Technologies Conference, San Francisco 1999

[15] Henrich, E., Dinjus, E., Meier, D.: *Hochwertige Biomassenutzung durch Flugstrom-Druckvergasung von Pyrolyseprodukten*; 13. Internationales Sonnenforum, Berlin 2002

[16] Dimmig, T., Radig, W.: *Bericht zur Erzeugung von Wasserstoff durch thermochemische Konversion von Biomasse – Sachstand und Perspektiven*, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Freiberg 2005

[17] RWE Power: *Programm Klimaschutz - IGCC-CCS-Kraftwerk mit CO_2-Abtrennung und –speicherung,* Januar 2008, RWE Power Aktiengesellschaft, Essen / Köln (www.rwe.com)

[18] Waldheim, L.: *Pressurized CFB Gasification of Biomass for Syngas Generation - the EU CHRISGAS project,* in Thermochemische Biomasse-Vergasung für eine effiziente Strom-/Kraftstoffbereitstellung - Erkenntnisstand 2007, Leipzig

[19] www.chrisgas.com

[20] Radig, W.: *Das BtL-Projekt der TU Bergakademie Freiberg*; in Thermochemische Biomasse-Vergasung für eine effiziente Strom-/Kraftstoffbereitstellung - Erkenntnisstand 2007, Leipzig

[21] Karl, J.: *Heatpipe Reformer – Versuchsergebnisse und Entwicklungsstand,* Thermochemische Biomasse-Vergasung, Leipzig 2007

[22] Montilva, P. M. D`Jesús: *Die Vergasung von realer Biomasse in überkritischem Wasser – Untersuchung der Prozessvariablen und Edukteigenschaften*; Universitätsverlag Karlsruhe, 2007

II.9.2 Patent- und Offenlegungsschriften

[P 1] **Offenlegungsschrift DE 2436531*: Verfahren zum Einbringen von Kohle in Druckgaserzeuger und in Druckfeuerungen***

Offenlegungstag: 12.02.1976

Anmelder: Batelle-Institut e.V. 6000 Frankfurt

Erfinder: Dr. Ferdinand Fink, 6374 Steinbach

[P 2] **Internationales Patent WO 01/10980 A1: *Zweistufiges Beschickungsverfahren für stückiges Einsatzgut und Stoffgemische in Druckräume***

Internationales Veröffentlichungsdatum: 15. Februar 2001

Anmelder: Krupp Uhde GmbH, Friedrich-Uhde-Straße 15, D-44141 Dortmund

Erfinder: Klein, Johannes, Rolevinckstr. 36, D-44141 Dortmund; Deutsch, Marco, Brunzlaustr. 56, D-44263 Dortmund; Abraham, Ralf, Lessingstraße 66, D-59192 Bergkamen

[P 3] **Internationales Patent WO 01/10981 A1: *Mehrstufiges Beschickungsverfahren für stückiges Einsatzgut und Stoffgemische in Druckräume***

Internationales Veröffentlichungsdatum: 15. Februar 2001

Anmelder: Krupp Uhde GmbH, Friedrich-Uhde-Straße 15, D-44141 Dortmund

Erfinder: Klein, Johannes, Rolevinckstr. 36, D-44141 Dortmund; Deutsch, Marco,

Brunzlaustr. 56, D-44263 Dortmund; Lütge, Christoph, Salzweg 45, D-59425 Unna; Abraham, Ralf, Lessingstraße 66, D-59192 Bergkamen

[P 4] **Patent DE 195 48 324 C2: *Verfahren zum Vergasen von kohlenstoffhaltigen Feststoffen in der Wirbelschicht sowie dafür verwendbarer Vergaser***

Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 06.08.1998

Patentinhaber: Rheinbraun AG, 50935 Köln

Erfinder: Meyer, Bernd, Prof. Dr., 09599 Freiberg, DE; Adlhoch, Wofgang H., Dr., 53913 Swisttal, DE; Mittelstädt, Alfred Gustav, 50354 Hürth, DE; Karkowski, Georg, 50935 Köln, DE; Schumacher, Ingo, 50735 Köln, DE

[P 5] **DE 102 42 594 B4: *Verfahren und Vorrichtung zum Einblasen von Vergasungsmittel in druckaufgeladene Vergasungsräume***

Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 06.10.2005

Patentinhaber: Sekundärrohstoff-Verwertungszentrum Schwarze Pumpe GmbH, 02979 Spreetal, DE; Envirotherm GmbH, 45136 Essen, DE

Erfinder: Meyer, Bernd, Prof. Dr., 09599 Freiberg, DE; Skoddow, Reinhard, Dipl.-Metallurge, 02977 Hoyerswerda, DE; Turna, Osman, Dipl.-Ing., 60322 Frankfurt, DE

[P 6] **DE 10 151 054 A1:*Verfahren zur Behandlung von Biomasse***

Offenlegungstag: 20.04.2003

Anmelder: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 76133 Karlsruhe, DE

Erfinder: Henrich, Edmund, Dr., 76706 Dettenheim, DE; Dinjus, Eckhard, Prof., Dr., 76774 Leimersheim, DE; Meier, Dietrich, Dr., 21033 Hambur, DE

[P 7] **DE 10 2004 019 203 B3: *Verfahren zur Vergasung lagerstabiler Biomasse zu Synthesegas***

Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 22.12.2005

Anmelder: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 76133 Karlsruhe, DE

Erfinder: Henrich, Edmund, Dr., 76706 Dettenheim, DE; Raffelt, Klaus, 76131 Karlsruhe, DE

[P 8] **DE 10 2005 043 212 A1: *Verfahren und Vorrichtung zur Erzeugung von Synthesegasen durch Partialoxidation von aus aschehaltigen Brennstoffen hergestellten Slurries und Vollquenchung des Rohgases***

Offenlegungstag: 15.03.2007

Anmelder: Future Energy GmbH, 09599 Freiberg, DE; Schingnitz, Manfred, Dr.-Ing., 09599 Freiberg, DE

Erfinder: Schingnitz, Manfred, Dr.-Ing., 09599 Freiberg, DE; Holle, Bernd, 09599 Freiberg, DE; Fischer, Norbert, 09638 Lichtenberg, DE

[P 9] **DE 10 2005 042 640 A1: *Verfahren und Vorrichtung zur Erzeugung von Synthesegasen durch Partialoxidation von aus aschehaltigen Brennstoffen hergestellten Slurries mit Teilquenchung und Abhitzegewinnung***

Offenlegungstag: 29.03.2007

Anmelder: Future Energy GmbH, 09599 Freiberg, DE; Schingnitz, Manfred, Dr.-Ing., 09599 Freiberg, DE

Erfinder: Schingnitz, Manfred, Dr.-Ing., 09599 Freiberg, DE; Mehlhose, Friedemann, 09599 Freiberg, DE; Bergt, Torsten, 09599 Freiberg, DE

II.10 Abkürzungsverzeichnis

BM	**B**io**m**asse
BtL	**B**iomass **t**o **L**iquid
EDX	Energiedispersive Röntgenstrahlen-Analyse (**E**nergy **D**ispersive **X**-Ray Analysis)
FTS	**F**ischer **T**ropsch-**S**ynthese
FTIR	**F**ourier-**T**ransformations-**IR**-Spektroskopie
FZK	**F**orschungs**z**entrum **K**arlsruhe
GPS	**G**anz**p**flanzen**s**ilage
GuD	**G**as- **u**nd **D**ampfturbinen-Prozess
HTW	**H**och**t**emperatur-**W**inkler-Vergaser
H_u	Unterer Heizwert
IGCC	**I**ntegrated **G**asification **C**ombined **C**ycle
KAT	**Kat**alysator
LPG	**L**iquified **P**etroleum **G**as
MW	**M**ega**w**att
N^3m	Normkubikmeter
PG	**P**ermanent**g**as
PLS	**P**rozess**l**eit**s**ystem
REM	**R**asterel**e**ktronen**m**ikroskop
Rezi	**Rezi**rkuliertes Abgas
SNG	**S**ynthetic **N**atural **G**as
SVZ	**S**ekundärrohstoff-**V**erwertungs**z**entrum
SCWG	**S**uper **C**ritical **W**ater **G**asification
TLL	**T**hüringer **L**andesanstalt für **L**andwirtschaft
VVBGC	**V**äxjö **V**ärnamo **B**iomass **G**asification **C**entre
ZWS	**Z**irkulierende **W**irbel**s**chicht

II.11 Abbildungsverzeichnis

Abb. II.3.1-1	Apparatefließbild des ArtFuel-Vergasers	S. 16
Abb. II.3.2-1	Technikumsanlage Rückschubrost der CUTEC	S. 17
Abb. II.5.1.1-1	Agglomeriertes Bettmaterial nach Überschreiten des Ascheerweichungspunktes und verbackenes Bettmaterial im unteren Teil der Wirbelschicht, direkt über dem Düsenboden	S. 22
Abb. II.5.1.1-2	Ablagerungen in der Rohgasstrecke	S. 23
Abb. II.5.1.1-3	Korrodierter Kompensator zwischen Heißgasfiltr und Quenche	S. 23
Abb. II.5.1.2-1	Hauptkomponenten, H_2:CO-Verhältnis sowie Heizwert des Reingases	S. 24
Abb. II.5.1.2-2	Gaszusammensetzung Permanentgas (teer- und wasserrei)	S. 25
Abb. II.5.1.2-3	Wassergehalte und Teerkonzentration	S. 26
Abb. II.5.1.2-4	Kohlenstoffumsatz und Kaltgaswirkungsgrad	S. 27
Abb. II.5.1.2-5	HCl-Konzentration im Rohgas und Vergleich mit FTIR-Vergleichsanalyse	S. 28
Abb. II.5.1.2-6	Feststoff- und Eluatkonzentration des Elementes Kalium in Bett- und Filterasche bei der Vergasung von Mais-, Gersten- und Roggenpellets	S. 30
Abb. II.5.1.2-7	Feststoff- und Eluatkonzentration des Elementes Phosphor in Bett- und Filterasche bei der Vergasung von Mais-, Gersten- und Roggenpellets	S. 30
Abb. II.5.1.2-8	REM-Aufnahme Bettasche	S. 31
Abb. II.5.1.2-9	REM-Aufnahme Siphonasche	S. 31
Abb. II.5.1.2-10	REM-Aufnahme Filterasche	S. 32
Abb. II.5.1.2-11	REM-Aufnahme Roggenasche	S. 33
Abb. II.5.1.3-1	Zusammensetzung des Permanentgases (teer- und wasserfrei)	S. 34
Abb. II.5.1.3-2	Teergehealte der Selbelang II-Versuchswoche	S. 35
Abb. II.5.1.3-3	Kaltgaswirkungsgrad und Kohlenstoffumsatz	S. 35
Abb. II.5.1.3-4	Spezifischer Sauerstoffbedarf, bezogen auf trockene Biomasse	S. 36
Abb. II.5.1.3-5	Spezifischer Dampfbedarf, bezogen auf trockene Biomasse	S. 37
Abb. II.5.1.4-1	Teergehalte aller Versuchspunkte, aufgetragen über der mittleren Vergasungstemperatur	S. 38
Abb. II.5.1.4-2	Heizwerte der Versuchspunkte, aufgetragen über der mittleren Vergasungstemperatur	S. 39

Abb. II.5.1.4-3 H_2/CO-Verhältnis, aufgetragen über der mittleren Vergasungstemperatur S. 40

Abb. II.5.1.4-4 Leistung der Begleitheizung und CO_2-Gehalt des Permanentgases vergleichbarer Versuchspunkte, aufgetragen über dem Vergasungsverhältnis S. 41

Abb. II.5.2.1-1 Nassentschlacker bei Kalkzugabe S. 42

Abb. II.5.2.1-2 Schlackebrocken beim manuellen Austrag aus dem Feuerraum S. 43

Abb. II.5.2.1-3 Austrag Nassentschlacker ohne Kalkzugabe S. 43

Abb. II.5.2.1-4 Ablagerungen auf den Rohren und im unteren Teil des Wärmetauschers S. 44

Abb. II.5.2.2-1 Gewebefilterasche S. 44

Abb. II.5.2.2-2 Beispielhaftes Rostaschekorn bei unterschiedlichen Vergrösserungen S. 45

Abb. II.5.2.3-1 Verlauf der Emissionswerte wichtiger Verbindungen S. 46

Abb. II.7.2-1 Druck- und Temperaturabhängigkeit der heterogenen Vergasungsgleichgewichte S. 51

Abb. II.7.5.1-1 Anlagenschema Värnamo S. 55

Abb. II.7.6.1-1 GSP-Flugstrom-Druckvergasung mit Gasaufbereitung S. 56

Abb. II.7.6.3-1 Carbo-V®-Prozess S. 58

Abb. II.7.6.4-1 Värnamo S. 58

Abb. II.7.6.5-1 HTW-Plus / PHTW – Vergaser der TU Bergakademie Freiberg S. 60

Abb. II.7.6.7-1 Vereinfachtes Prozessschema der Pilotanlage Verena S. 62

Abb. II.7.7.2-1 Längsschnitt HTW-Wirbelschichtvergaser S. 64

II.12 Tabellenverzeichnis

Tab. II.2-1	Charakteristische Brennstoffwerte (Auszug)	S. 13
Tab. II.2-2	Ascheverhalten gemäß DIN 51730 mit einer Veraschung bei 815 ℃	S. 14
Tab. II.2-3	Ascheverhalten unter thermischer Last bei niedriger Veraschungs-temperatur	S. 15
Tab. II.4.2-1	Parameter der Versuchsdurchführung	S. 20
Tab. II.5.1.2-1	Aufschluss- und Eluatuntersuchungen der Bett- und Filteraschen bei der Vergasung von Mais-, Gersten- und Roggenpellets	S. 29
Tab. II.5.1.2-2	EDX-Analyse der Flächenaufnahme in Abb. 5.1.2-10	S. 31
Tab. II.5.2.2-1	Beispielhafte EDX-Analyse der REM-Untersuchungen	S. 45
Tab. II.7.4.1-1	IGCC-Kohlekraftwerke	S. 53

III. Begleitforschung von der Silage bis zum Pellet

III.1 Einleitung

Der Projektansatz basierte auf der Produktion von Energiepflanzenpellets entsprechend der Feuchtgutlinie (Scheffer 1997, Stülpnagel 1998). Nach diesem Konzept wurden aus Silagen über die Aufbereitungsschritte Entwässern, Trocknen und Pelletieren lagerfähige Energiepflanzenpellets zur weiteren energetischen Nutzung (Vergasung / Verbrennung) hergestellt. Der anfallende Presssaft sollte in einer Biogasanlage vergoren und die im BHKW erzeugte Wärme bzw. Elektroenergie in der Pelletsproduktion genutzt werden.

Im Rahmen der ökonomischen Begleitforschung hatte die TLL zwei Themenkomplexe zu bearbeiten. Der erste Schwerpunkt lag auf der pflanzenbaulichen Bewertung der im Produktionsprozess (s. **Abb. III.1-2**) anfallenden Nebenprodukte. Hierbei handelte es sich, nach der Reihenfolge ihrer Entstehung, um Presssäfte aus der Entwässerung feucht konservierter Silagen, Gärrückstände aus der Presssaftvergärung und Aschen aus der Konversion der Energiepflanzenpellets. Über die in den Gefäßversuchen ermittelte Düngewirkung sollte eine ökonomische Beurteilung der aufgeführten Nebenprodukte möglich sein.

Im zweiten Arbeitsschwerpunkt wurden auf Basis von Projektdaten aus den Teilvorhaben 2 bis 6 die Kosten von Energiepflanzenpellets, einschließlich der Nebenproduktverwertung, ab Anlage ermittelt. Ausgangspunkt der ökonomischen Bewertung war die quantitative Definition der Produktionskapazitäten von Anlagen zur Energiepelletherstellung.

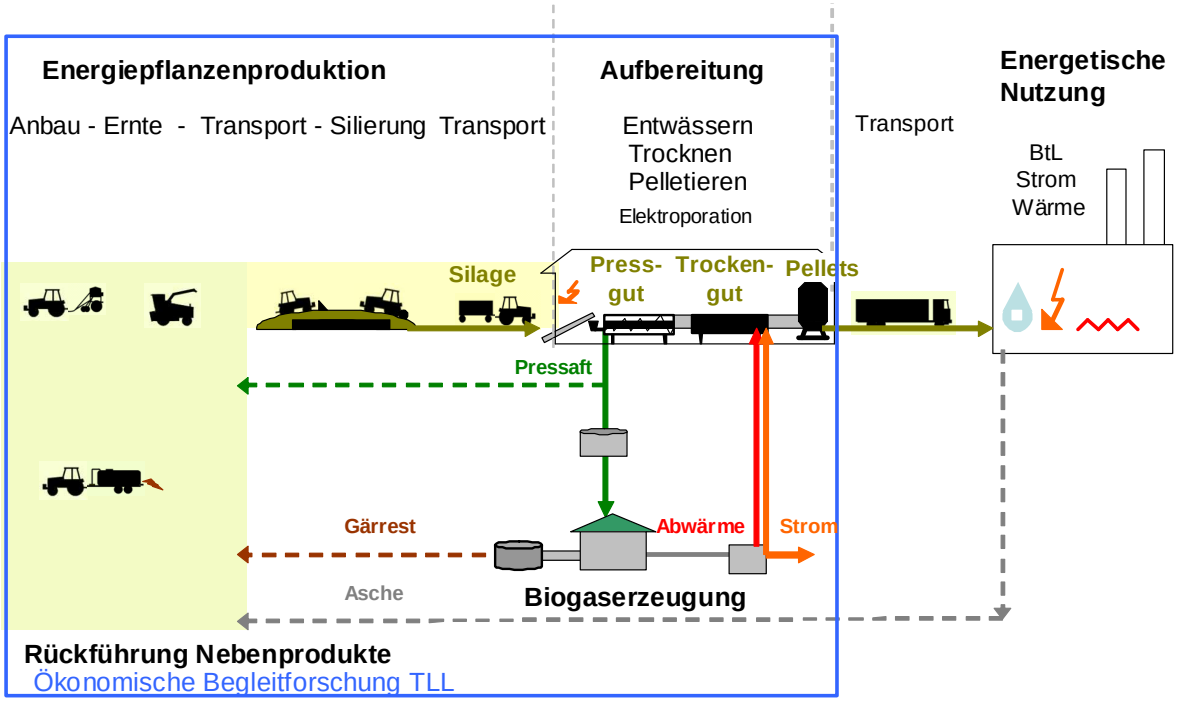


Abb. III.1-2: Gesamtdarstellung des Verfahrens

III.2 Gefäßversuche zur pflanzenbaulichen Nutzung der Nebenprodukte

Wie bereits dargestellt, fallen im Produktionsprozess Presssäfte, Gärrückstände und Aschen an. Im Hinblick auf eine kreislaufwirtschaftliche Behandlung der Nebenprodukte (s. **Abb. III.1-2**) war zu prüfen, ob diese einer Verwertung oder Beseitigung zugeführt werden können bzw. müssen. Eine Nutzung ist immer der Entsorgung vorzuziehen. Mit den vorliegenden Gefäßversuchen sollten die Verwertungsmöglichkeiten als landwirtschaftlicher Sekundärrohstoffdünger geprüft und aufgezeigt werden. Dabei war u. a. herauszustellen, ob der anfallende frische Presssaft neben der Nutzungslinie „Biogaserzeugung“ auch als Düngemittel geeignet ist. Weil der Presssaft als erstes Nebenprodukt der Praxisversuche in ausreichenden Mengen zur Verfügung stand, wurden hierzu die umfangreichsten Untersuchungen (drei Versuchsserien) durchgeführt. Mit den Aschen konnten zwei Versuche und mit den Gärrückständen ein Versuch angelegt werden. Die ermittelten Mineraldüngeräquivalente sind auf Grund des relativ kurzen Versuchszeitraumes zum Teil nur durch einjährige Ergebnisse belegbar. Um zu noch fundierteren Aussagen zu gelangen, sind weitere Untersuchungen der eingesetzten Substrate, deren Einfluss auf die Bodenreaktionen und das Pflanzenwachstum erforderlich. Die verwendeten Produkte sind im Hinblick auf die Düngungsversuche als unbekannte Materialien einzustufen. Im Laufe der Versuche mussten zunächst Erkenntnisse zum Umgang mit den Produkten (Ausbringung, Pflanzenverträglichkeit) gewonnen werden. Die Ergebnisse zur Düngewirkung sind deshalb als erste Abschätzung zu verstehen und sollten durch weitere Forschungsarbeiten abgesichert werden.

III.2.1 Material und Methoden

Das Prinzip des Gefäßversuches besteht darin, die Prüffaktoren (z. B. N-, P-, bzw. K-Gehalt) in Abhängigkeit des Nährstoffgehaltes einzelner Produkte stufenweise zu verabreichen, während alle anderen Faktoren konstant bleiben (Schilling, 2000). Allerdings ist dieser Anspruch bei der Prüfung von Wirtschaftsdüngern und anderen potenziellen Sekundärrohstoffdüngern wie Aschen, Presssäften und Gärrückständen wegen der schwankenden Mehrnährstoffverhältnisse versuchstechnisch und methodisch nicht immer leicht zu erfüllen. Weitestgehend homogen können im Gefäßversuch die abiotischen Faktoren Wasser, Licht, Temperatur und Boden gestaltet werden.

Alle im Rahmen des Projektes geplanten Gefäßversuche wurden in der Gefäßversuchsstation der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) in Jena Zwätzen durchgeführt.

Krankheiten, Virosen und tierische Schädlinge als biotische Faktoren wurden in den durchgeführten Versuchen nach den Grundsätzen der guten Pflanzenschutzpraxis bekämpft. Um optimale Ausgangsbedingungen für die Folgefrüchte zu schaffen, wurden die Gefäße nach der Ernte der Vorfrüchte aufbereitet. Dies geschah durch ausreichendes Durchmischen des Bodens und eine entsprechende Zerkleinerung der Erntereste (Wurzel- und Stoppelrückstände).

III.2.1.1 Düngungsstufen

In den Jahren 2006 und 2007 wurden in einem landwirtschaftlichen Betrieb in Brandenburg Silagen aus Roggen, Mais und Gras für das BioLog-Projekt hergestellt. Im Trockenfutterwerk Selbelang erfolgte das Entwässern, Trocknen und Pelletieren praxisüblicher Silagemengen. Ein Teil der in den Praxisversuchen gewonnenen Presssäfte kam im Gefäßversuch zum Einsatz, ein anderer Teil, aus der gleichen Charge, wurde zur Biogaserzeugung (vTI) verwendet. Der hieraus entstehende Gärrückstand konnte ebenfalls im Gefäßversuch untersucht werden. Die in Selbelang produzierten Pellets dienten als Brennstoff für die weitere Konversion bei der Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH (CUTEC). Die bei den Vergasungsversuchen der CUTEC in der zirkulierenden Wirbelschicht anfallende Asche wurde ebenfalls im Gefäßversuch geprüft. Anhand der Gefäßversuche sollten mittels gestaffelter Nährstoffgaben Aussagen zur Pflanzenverträglichkeit und Düngewirksamkeit der Nebenprodukte abgeleitet werden. Die Höhe der Düngungsstufen richtete sich nach für Gefäßversuche optimalen, kulturartenabhängigen Nährelementbedarfsmengen, welche auf langjährigen Praxiserfahrungen der TLL basieren. Mit dem Ziel deutliche Ertragseffekte zu erreichen, wurden für die einzelnen Düngungsstufen entsprechende Spannbreiten festgelegt (**Tab. III.2.1.1-1**).

Tab. III.2.1.1-1: Staffelung der Nährstoffgaben

Nebenprodukt	Düngungsstufen in g/Gefäß										
	N			P				K			
Presssaft	0,6	1,2	2,4	0,3	0,6	-	-	-	-	-	-
Gärrückstand	0,6	1,2	2,4	0,3	0,6	-	-	-	-	-	-
Asche	-	-	-	0,4	0,8	1,2	1,6	1,5	3,0	4,5	6,0

Je nach Nährstoffgehalt der Prüfsubstrate ergaben sich unterschiedlich hohe Aufwandmengen. Andere Ansätze (Knoblauch, 1990) orientierten sich an praxisüblichen Ausbringungsmengen. Hierbei wurde die zu verabreichende Menge in m³/ha auf das Gefäß heruntergerechnet, so dass die Höhe der Nährstoffzufuhr als abhängige Größe zwischen den Substraten (z. B. Presssaft von Roggen, Mais und Gras) variiert.

Die Düngung mit Presssaft, Gärrückstand bzw. Asche erfolgte immer zur ersten Fruchtart einer Versuchsserie[1]. Um eine ausreichende Versorgung der Versuchspflanzen im ersten und zweiten Nachbau sicherzustellen, wurde auf Basis von Pflanzen- und Bodenuntersuchungen die mineralische Düngung, mit Ausnahme der Prüffaktoren, weiter fortgeführt. Als Voraussetzung zur Berechnung der Mineraldüngeräquivalente (MDÄ) war in jedem Versuch eine Mineraldüngervariante anzulegen. Als mineralische Referenzdünger kamen zum Einsatz: N-Versuch: Ammoniumnitrat (NH_4NO_3), P-Versuch: Monokalziumphosphat ($Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$), K-Versuch: Kaliumsulfat (K_2SO_4). Alle anderen Nährstoffe wurden optimal gedüngt.

[1] Versuchsserie: bezeichnet die Nummer eines Versuches

III.2.1.2 Prüfsubstrate

Presssäfte

Beim Vergleich der Presssäfte (**Tab. III.2.1.2-1**) ließen sich z. T. deutliche Unterschiede erkennen. Besonders auffällig waren die hohen TM-Gehalte des Roggenpresssaftes, welche auf die schlechteren Entwässerungseigenschaften der Roggensilage gegenüber Mais- und Grassilage zurückzuführen sind. Bei der Silageverarbeitung in der Schneckenpresse wirken Scherkräfte, die Partikel geringer Größe herauspressen (Rinder, 2008). Zusammen mit dem Presswasser gelangen diese in den Sammelbehälter, wo sie bereits nach kurzer Zeit sedimentieren. Zur Probenentnahme und zum Versuchsansatz war deshalb eine Homogenisierung durch ausreichendes Schütteln sicherzustellen. Je mehr Trockensubstanz abgepresst wurde, umso größer war auch der Nährstoffanteil im Presswasser. Die im Vergleich zu anderen Wirtschaftsdüngern, wie z. B. Rindergülle (8 % TS, 3.800 mg N/l[2], 660 mg P/l, TLL 2007 a) (**Tab. III.2.1.2-1**) ähnlich hohen Stickstoff- und z. T. deutlich höheren Phosphorgehalte begründen die Untersuchungswürdigkeit im Hinblick auf die Düngewirkung.

Tab. III.2.1.2-1: Eigenschaften untersuchter Presssäfte

Parameter	ME	Presssaft aus:					
		Roggensilage		Maissilage		Grassilage	
		Untersuchungsjahr					
		2007	2008	2007	2008	2007	2008
TM	% OS	16	14,6	9,6	9,6	8,8	5,2
OTM	% TM	89,5	82,4	85,4	85,7	77,7	68,7
el. LF	µS/cm	13.910	24.900	17.220	15.240	22.600	23.800
pH	-	3,8	4,0	3,8	3,8	3,9	4,4
KB (8,2)	mmol/l	554	451	498	436	257	184
KS (4,3)	mmol/l	0	<0,010	0	75,3	0	34
CSB	mg O_2/l	240.000	144.000*	178.000	184.000*	114.000	68.000*
BSB_5	mg O_2/l	141.000		109.000		70.100	
Nt	mg/l	4.870	6.700	5.193	3.427	3.519	3.427
NH_4-N	mg/l	773	117	1.041	721	437	105
NO_3-N	mg/l	54	252	13	13	19	12
P	mg/l	1.338	1.160	1.468	1.910	859	500
K	mg/l	6.317	10.200	5.225	5.350	5.168	6.140
Na	mg/l	13,7	129	4,16	8,24	1.002	357
Cl	mg/l	766	2.258	972	597	4.879	2.483
Ca	mg/l	1.210	1.260	522	873	1.709	940
Mg	mg/l	605	320	644	652	746	252

Untersuchungsmethode: TM/ bei 105° mit Gravimetrie; OTM/ Glühverlust bzw. organische Substanz durch Ver-aschen und Gravimetrie; elektr. Leitfähigkeit/ Potentiometrie; KB, KS/ Titrimetrie; CSB/ 38 409-H41;1980-12; BSB5/ DIN EN 1899-1 (H51); 1998-05; Nt/ TNb; NH4/ FIA; Nitrat/ IC; K, Mg, Na, Ca, S/ ICP-AES; * Wert vTI

Aschen

Während der Konversion der Biomassepellets in der zirkulierenden Wirbelschicht (Vodegel, Immisch, Schindler 2008) fallen verschiedene Aschefraktionen an. Von der eingesetzten

[2] Bei Rindergülle sind Stall- und Lagerungsverluste berücksichtigt

Biomasse fand sich der überwiegende Teil in der Heißgasfilterasche wieder. Da diese Asche pulverförmig und schlackefrei vorlag, war sie aufgrund ihrer Aggregateigenschaften gut für die technische Ausbringung im Gefäßversuch geeignet. Die Filterasche enthielt neben Vergasungsrückständen der Biomasse auch Zuschlagstoffe, die zum Aufrechterhalten des Vergasungsprozesses dienten. Hierbei handelte es sich in Größenordnungen um Ca und Si. Kennzeichnend für die verwendeten Aschen waren ein hoher pH- und BWB-Wert, eine hohe Reaktivität und hohe Kalkgehalte (**Tab. III.2.1.2-3**). Neben Kalzium bildeten Kalium und Phosphor die höchsten Anteile der Aschefraktion. Die Schwermetallgehalte werden in der Diskussion zum Ascheinsatz als möglicher Dünger gesondert dargestellt. Aus dem Anteil des wasserlöslichen K_2O bzw. des aac-löslichen P_2O_5 ließ sich die Düngewirkung tendenziell abschätzen. Von den Gesamt-K-Gehalten (RFA) waren 77 bzw. 83 % (Roggenasche 2007 bzw. 2008), 70 bzw. 41 % (Maisasche 2007 bzw. 2008) und 63 bzw. 77 % (Grasasche 2007 bzw. 2008) wasserlöslich. Beim P betrug der aac-lösliche Anteil 56 bzw. 42 % (Roggenasche 2007 bzw. 2008), 48 bzw. 33 % (Maisasche 2007 bzw. 2008) und 29 bzw. 57% (Grasasche 2007 bzw. 2008). Der z. T. hohe Anteil an löslichem P und K ließ eine gute Düngungswirkung erwarten.

Tab. III.2.1.2-2: Eigenschaften untersuchter Aschen

Parameter	ME	Asche von Pellets aus:					
		Roggensilage		Maissilage		Grassilage	
		Untersuchungsjahr					
		2007	2008	2007	2008	2007	2008
Glührückstand	% FM	60,9	56,7	55	76,2		73,6
TS	% FM	95,8	96,4	98,3	98,9		98,3
BWB	%$CaCO_3$	51	24	51	58		33
Reaktivität	%	100	97	100	97		88
pH	-	-	11,5	-	12,4		12,4
Corg	%	-	33,97	-	22,81		20,59
P (RFA)	% TM	1,37	1,93	0,466	1,06		1,06
P (CAL)	% des in der RFA bestimmten P	19	31	3	6		15
P (CAT)		<0,01	<0,01	<0,01	<0,01		<0,01
Paac		57	42	48	33		29
K (RFA)	% TM	6,07	11	1,44	3,68		8,93
K (CAL)	% des in der RFA bestimmten K	49	94	40	72		70
K (CAT)		55	7	53	2		7
Kwsl		77	84	70	41		63
Ca	% TM	20,4	6,12	20,6	21,4		11
Mg	% TM	0,791	0,785	0,535	0,67		0,88

Glührückstand/ Glührückstand (600℃) in Aschen; TM/ im Trockenschrank; BWB/ Titration; Reaktivität/ nach Sauerbeck mit Titration; Corg/ Elementaranalyse; Paac/ ICP-OES; Kwsl/ ICO-OES; Ca, Mg, Na/ RFA

Gärrückstände

Wie bereits erläutert, wurden parallel zu den „frischen“ Presssäften auch die vergorenen Presssäfte (**Tab. III.2.1.2-4**) pflanzenbaulich untersucht. Die Vergärungsversuche erfolgten am Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI) in Braunschweig. Im Gefäßversuch kamen Gärreste

aus Rührkesselreaktoren zum Einsatz. Die Reaktoren (Technikum) wurden über einen Zeitraum von mehreren Monaten kontinuierlich beschickt. Die Gärrückstände bestanden aus einem Gemisch von den in 2006 und 2007 gewonnenen Presssäften einer Silageart. Während der Vergärung haben sich die Presssafteigenschaften z. T. verändert. Dies betrifft v. a. den pH-Wert, der vom sauren in den schwach alkalischen Bereich gestiegen ist, den höheren NH_4-Anteil und die TM-Gehalte, die im Gärrückstand stark abgefallen sind (z. B. Mais von ca. 10 % auf ca. 3 %).

Tab. III.2.1.2-3: Eigenschaften untersuchter Gärrückstände

Parameter	ME	Gärreste aus: Roggensilage-presssaft	Gärreste aus: Maissilage-presssaft	Gärreste aus: Grassilage-presssaft
		Untersuchungsjahr		
		2008		
TM	% OS	3,8	2,8	2,3
OTM	% TM	57,4	58,2	35,6
el. LF	µS/cm	31.600	28.000	33.100
pH	-	8,18	8,16	8,11
KB (8,2)	mmol/l	<0,010	0,32	0,39
KS (4,3)	mmol/l	401	328	269,00
Nt	mg/l	3.869	3.667	2.858
NH4	mg/l	3.320	3.250	2.880
Nitrat	mg/l	4,83	2,03	2,81
Nitrit	mg/l	7,74	6,36	4,08
Ca	mg/l	839	395	634
P	mg/l	830	718	830
K	mg/l	6.460	4.840	5.960

TM/ 105℃ mit Gravimetrie; OTM/ Glühverlust bzw. Or ganische Substanz durch Veraschen und Gravimetrie; Elektrische Leitfähigkeit, pH/ Potentiometrie; KB, KS/ Titrimetrie; Nt/ TNb; NH4, Nitrat, Nitrit/ FIA; Ca; P, K/ ICP-OES

III.2.1.3 Versuchsböden

Die Auswahl der Böden orientierte sich an der Versuchsfrage und an dem zu prüfenden Nährelement. Um die Dünge- und Nährstoffwirkung untersuchen zu können, sollten die Gehalte der zu prüfenden Nährelemente in den verwendeten Böden nicht zu hoch sein. Nach der Bodenentnahme auf Praxisflächen wurden die Böden durch Sieben und Trocknen entsprechend homogenisiert. Zur Absenkung zu hoher Nährstoffgehalte und zur Verbesserung der Infiltration im Versuchsgefäß bestand die Möglichkeit, die Böden z. T. mit Quarzsand im Verhältnis 2:1 zu verschneiden. **Tab. III.2.1.3-1** gibt einen Überblick über die Eigenschaften der verwendeten Böden. In den N-Presssaftversuchen V1 und V2 wurde ein Mischboden mit einem niedrigen Gesamt-N-Gehalt von 0,16 % verwendet. Die Bodenmenge je Mitscherlichgefäß betrug 5,6 kg. Im P-Versuch kam ein Boden aus Wengelsdorf, mit einem P-Gehalt von 3,7 mg/100 g Boden (Gehaltsklasse B) zur Anwendung. Für den Ascheversuch V3 dienten zwei Böden der Herkunft „Wengelsdorf“, welche mit Sand im Verhältnis 2:1 verschnitten wurden (P-Versuch: 2,1 g P/100 g Boden (Gehaltsklasse A); K-Versuch: 4 g K/100 g Boden (Gehaltsklasse B)). Im Ascheversuch V6 wurde ein Boden aus Dachwig sowohl für den P-Versuch als auch für den K-Versuch genutzt.

Tab. III.2.1.3-1: Eigenschaften der verwendeten Böden

Parameter	ME	Boden				
		Mischboden	Wengelsdorfer 1 (rein)	Wengelsdorfer 1 + Sand (2:1)	Wengelsdorfer 2 + Sand (2:1)	Dachwiger + Sand (2:1)
Versuch	-	V1 - PS - N V2 - PS - N	V1 - PS - P V2 - PS - P V5 - GS - P	V3 - AS - P	V3 - AS - K	V4 - PS - N V5 - GS - N V6 - AS - P V6 - AS - K
Bodenart / Bodenartengruppe	-	lS mittel bis stark lehmiger Sand	sL/uL Sandig /schluffiger Lehm	l`S schwach lehmiger Sand	l`S schwach lehmiger Sand	sL sandiger Lehm
pH-Wert ($CaCl_2$)	-	6,8	6,4	6,4	6,0	7,0
Tongehalt	%	11,7	22	16	16	20
Humusgehalt	%	2,9	2,7	1,7	1,7	2,6
Corg	%	1,68	1,55	1,0	1,0	1,5
$CaCO_3$	%	0,9	0,5	<0,5	<0,5	0,8
P(CAL)	mg/100 g Boden	22,2	3,7	2,1	4,1	2,4
K (CAL)	mg/100 g Boden	16,0	13,3	12	4	7
Mg ($CaCl_2$)	mg/100 g Boden	10,4	11,8	11,6	10,8	12,5
Nt	%	0,16	0,16	0,11	0,11	0,16

III.2.1.4 Versuchspflanzen

Die Auswahl der Versuchspflanzen orientierte sich an einem hohen Düngebedürfnis für den zu prüfenden Faktor. Dies ist i. d. R. bei Pflanzen mit hohen Trockenmasseerträgen in einer kurzen Vegetationszeit wie z. B. Mais gegeben. Um einen möglichst frühzeitigen Versuchsbeginn zu gewährleisten, kam Winterroggen als erste Kultur zum Anbau. Nach der Aussaat in Ansaatschalen und anschließender Vernalisation bei niedrigen Temperaturen erfolgte per Hand das Einpflanzen des Roggens in die Gefäße zu EC 21/22 (13 Pflanzen/Gefäß).

Als dritte Versuchspflanze wurde Welsches Weidelgras gewählt, das durch seine Mehrschnittigkeit eine gute Abschöpfung der im Boden verbleibenden Nährstoffe und somit Aussagen zur Nachwirkung der geprüften Nährstoffe ermöglicht. Mit einer Aussaatmenge von 13 Körnern/Gefäß beim Mais und 1,0 g/Gefäß beim Gras erfolgte bei diesen Kulturen eine direkte Aussaat in die Gefäße. Der Mais wurde im Drei- bis Fünfblattstadium auf 7 Pflanzen vereinzelt. Ein weiterer Grund für die getroffene Pflanzenauswahl (**Abb. III.2.1.4-1**) ergab sich aus der Fruchtartenauswahl zur weiteren ökonomischen Begleitforschung des BioLog-Verbundvorhabens.

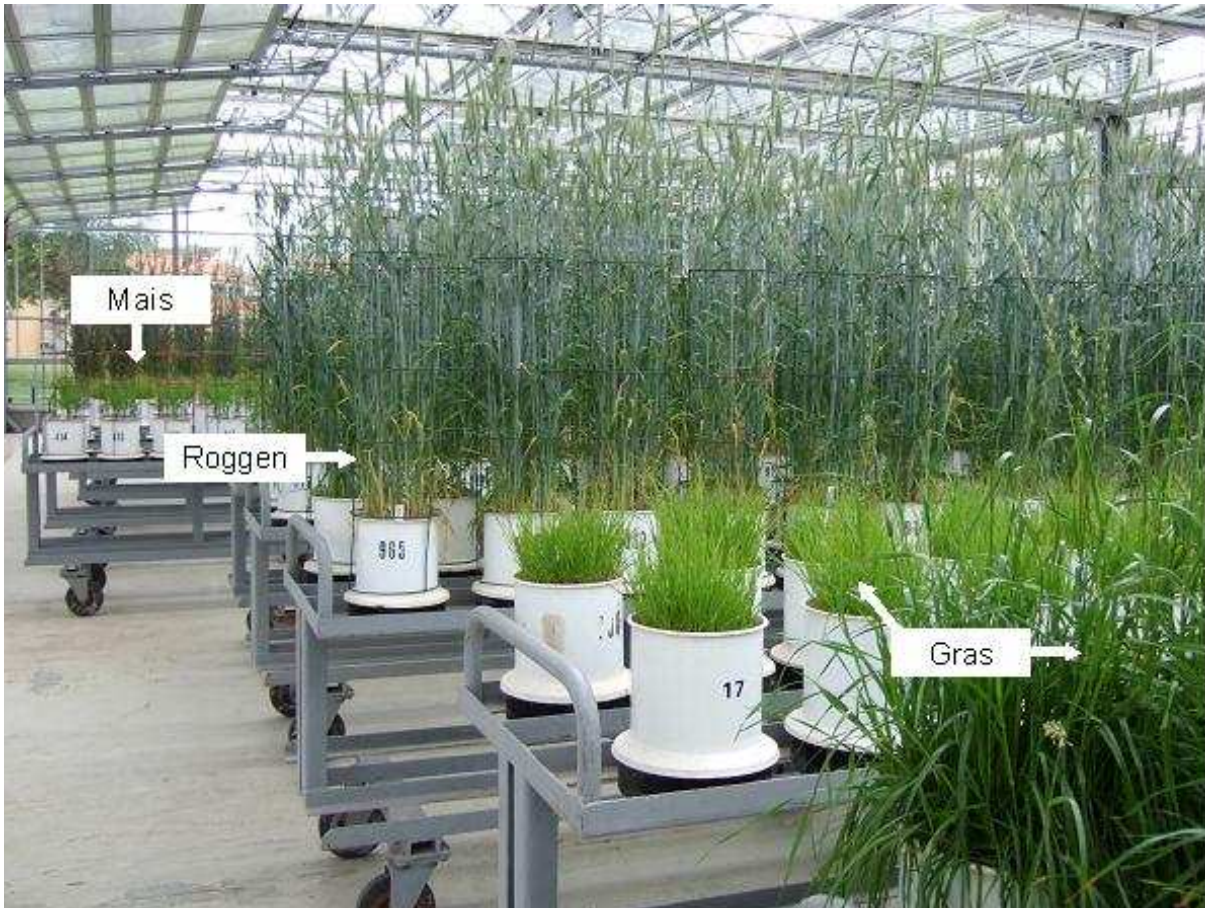


Abb. III.2.1.4-1: Gefäßversuchsstation der TLL mit „BioLog-Versuchen“

III.2.1.5 Versuchsanlage

Die Gefäßversuche wurden im Kaltgewächshaus der TLL angelegt. Dieses besitzt die klassische Dreiteilung: 1. Glashalle (s. **Abb. III.2.1.4-1**), 2. Drahthalle und 3. Freigelände. Im Gewächshaus standen die Pflanzen auf transportablen Gefäßwagen, die bei unsicheren Witterungsbedingungen (Regen, Sturm) in den Glasteil bewegt werden konnten. Bei berechenbaren Außenbedingungen verlief die Pflanzenentwicklung unter natürlichen Temperatur- und Lichtbedingungen in der Drahthalle. Als Versuchsgefäße kamen Mitscherlichgefäße mit einem Fassungsvermögen von 5 bis 6 kg Boden zum Einsatz. **Tab. III.2.1.5-1** gibt einen Überblick zu den durchgeführten BioLog-Gefäßversuchen.

Tab. III.2.1.5-1: Übersicht Gefäßversuche

Nr.	Nebenprodukt	Art	Prüffaktor	Fruchtfolge		
				1	2	3
V1	Preßsaft	RG, SM, GR	N, P	Winterroggen	Silomais	Gras
V2	Preßsaft	RG, SM, GR	N, P	Silomais	Winterroggen	Gras
V3	Asche	RG, SM	P, K	Silomais	Winterroggen	Gras
V4	Preßsaft	RG, SM, GR	N	Silomais	-	-
V5	Gärrest	RG, SM, GR	N, P	Silomais	Gras	-
V6	Asche	RG, SM, GR	P, K	Silomais	-	-

Versuchsbeginn 2007 Versuchsbeginn 2008

Im Versuch 1 wurde als erste Fruchtart Winterroggen in die Gefäße gepflanzt, es erfolgte ein Nachbau mit Silomais und anschließend mit Gras.

Um herauszustellen, ob verschiedene Kulturarten als Erstfrucht unterschiedlich auf die Presssäfte reagieren, wurde im Versuch 2 Mais als erste Fruchtart etabliert. Nach der Maisernte folgten Roggen und Gras. Die untersuchten Presssäfte entsprachen denen, die im Versuch 1 zum Einsatz kamen. Im ersten Ascheversuch (Versuch 3) konnte nach dem Mais die Neuanpflanzung mit Roggen in 2008 sowie nach dessen Ernte noch eine Graseinsaat realisiert werden. Im Versuch 4 stand Silomais aus Zeitgründen als einzige Versuchspflanze zur Verfügung. Im Gärrestversuch (Versuch 5) wurden Mais und Gras angebaut. Der zweite Ascheversuch konnte innerhalb der Projektlaufzeit ebenfalls nur mit nur einer Versuchspflanze (Mais) belegt werden.

Die Frischmasseerträge der Versuchspflanzen wurden gefäßweise, die TM- und Nährstoffgehalte prüfgliedweise ermittelt.

Versuch 1 und 2: Presssaft 2007

In den Presssaftversuchen 3 und 4 wurde der gleiche Presssaft verwendet. Die Versuche unterschieden sich ausschließlich in der Fruchtfolge (**Tab. III.2.1.5-1**).

Da sich die Höhe der Ausbringungsmenge (**Tab. III.2.1.5-2**) nach dem Prüffaktor, der Nährstoffkonzentration und der Düngungsstufe richtete, lag die Gesamthöhe der zu düngenden Mengen zwischen 115 ml PS/Gefäß (PS-SM/0,6 g N) und 700 ml/Gefäß (PS-GR/ 0,6 g P). Ab Presssaftmengen von über 350 ml/Gefäß traten durch Verkleben und Verstopfen der Dosiervorrichtung der Ansatzmaschine Probleme beim Einmischen des Saftes in den Boden

auf. Aus diesem Grund wurde die maximale Presssaftgabe zum Gefäßansatz auf 350 ml begrenzt. Die Applikationsmenge (Presssaft und Mineraldünger) entfiel zu 50 % auf den Gefäßansatz und zu jeweils 25 % auf die erste und zweite Nachdüngung. Während die Materialien zum Ansatz in den Boden eingearbeitet wurden, erfolgte in der Nachdüngung das Einschwämmen der Presssäfte und Mineraldünger durch Gießen. Auf Applikation mit Graspresssaft musste in Versuch 2 bei der letzten Stufe verzichtet werden, da nicht mehr genügend Material zur Verfügung stand.

Tab. III.2.1.5-2: Nährstoff- und Presssaftmenge V1/ V2 (Prüffaktor N und P, Wdh. = 4

Material	Prüffaktor									
	N					P				
	Prüf-glied Nr.	Stufe g N/ Gefäß	ml PS/ Gefäß	kg N/ ha	m³/ha	Prüf-glied Nr.	Stufe g P/ Gefäß	ml PS/ Gefäß	kg P/ ha	m³/ha
UK	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-
MD	2	0,6	-	193	-	2	0,3	-	97	-
	3	1,2	-	386	-	3	0,6	-	194	-
	4	2,4	-	771	-	-	-	-	-	-
PS-RG	5	0,6	125	"	40	4	0,3	225	"	72
	6	1,2	250	"	80	5	0,6	450	"	146
	7	2,4	500	"	160	-	-	-	-	-
PS-SM	8	0,6	115	"	37	6	0,3	205	"	66
	9	1,2	230	"	74	7	0,6	410	"	132
	10	2,4	460	"	148	-	-	-	-	-
PS-GR	11	0,6	170	"	55	8	0,3	350	"	113
	12	1,2	340	"	109	9	0,6*	700	"	132
	13	2,4*	680	"	217	-	-	-	-	-

* bei Versuch 2 entfallen

Die mineralische Nachdüngung für die Zweit- bzw. Drittfrucht richtete sich nach Erfahrungswerten und Pflanzenanalysen**.** Im N-Versuch unterblieb die weitere N- und im P-Versuch die weitere P-Düngung (**Tab. III.2.1.5-2**).

Versuch 3: Asche 2007

Für den ersten Ascheversuch (Versuch 3) stand Filterasche aus der Konversion von Maissilage- und Roggensilagepellets zur Verfügung. Aufgrund der erheblichen P und K-Gehalte (**Tab. III.2.1.5-3**) der zwei Aschen ergaben sich große Unterschiede in der Aufwandmenge.
Bei Phosphor musste je Düngungsstufe etwa die dreifache Menge an Maisasche im Vergleich zur Roggenasche ausgebracht werden. Bei der Kalidüngung wurde die vierfache Menge benötigt.

Tab. III.2.1.5-3: Nährstoff- und Aschemenge V3 (Prüffaktor P und K, Wdh. = 4)

Material	Prüf-glied Nr.	Prüffaktor							
		P				K			
		Stufe g P/ Gefäß	g AS/ Gefäß	kg P/ ha	t AS/ ha	Stufe g K/ Gefäß	g AS/ Gefäß	kg K/ ha	t AS/ ha
UK	1	0	-	-	-	0	-	-	-
MD	2	0,4	-	127	-	1,5	-	478	-
	3	0,8	-	255	-	3,0	-	955	-
	4	1,2	-	382	-	4,5	-	1433	-
	5	1,6	-	510	-	6,0	-	1911	-
AS-RG	6	0,4	30	"	10	1,5	26	"	7
	7	0,8	61	"	20	3,0	52	"	15
	8	1,2	91	"	30	4,5	77	"	22
	9	1,6	122	"	40	6,0	103	"	30
AS-SM	10	0,4	87	"	33	1,5	106	"	34
	11	0,8	175	"	65	3,0	212	"	68
	12	1,2	262	"	98	4,5	318	"	102
	13	1,6	349	"	131	6,0	424	"	136

Da die Asche leicht zur Staubbildung neigt, ist eine gleichmäßige Düngung in den bereits gewachsenen Bestand kaum möglich. Dies erfordert die Ausbringung der gesamten Aschemenge zum Versuchsansatz.

Versuch 4: Presssaft 2008

Im Versuch V4 (**Tab. III.2.1.5-4)** sollte neben der in V1 und V2 erprobten Variante gestaffelter Presssaftgaben in bzw. auf den unvorbereiteten Boden auch eine Variante mit $CaCO_3$-Düngung erfolgen. Das Ziel dieser Maßnahme bestand darin, den stark sauren pH-Wert des Presssaftes abzupuffern. In einer dritten Variante wurde die gesamte Presssaftmenge 4 Wochen vor der Aussaat in den Boden eingearbeitet.

Tab. III.2.1.5-4: Nährstoff- und Presssaftmenge V4 (Prüffaktor N, Wdh. = 3)

für Varianten a: $CaCO_3$/ Presssaftausbringung im Splittungverfahren (50 % zum Ansatz, 25 % zur ersten Gabe, 25 % zur zweiten Gabe,); b: Presssaft rein/ Ausbringung wie a; c: Presssaft rein / Ausbringung 100 % vier Wochen vor Aussaat

Material	Prüf-glied Nr.	N			
		Stufe g N/ Gefäß	ml PS/ Gefäß	kg N/ ha	m³/ ha
UK	1	-	-	-	-
MD	2	0,6	-	193	-
	3	1,2	-	386	-
	4	2,4	-	771	-
PS-RG	5	0,6	175	"	56
	6	1,2	350	"	112
	7	2,4	700	"	223
PS-SM	8	0,6	175	"	56
	9	1,2	350	"	112
	10	2,4	700	"	223
PS-GR	11	0,6	90	"	29
	12	1,2	179	"	57
	13	2,4*	358	"	114

Versuch 5: Gärrückstand 2008

Analog zum Versuchsaufbau der Presssaftversuche erfolgten Gärrestversuche. Wegen der deutlich niedrigeren TM-Gehalte der Gärreste (2,3 bis 3,8 % TS) im Vergleich zu den Presssäften (5,2 bis 16 % TS) fielen die Ausbringungsmengen (ml Gärrest/ Gefäß) deutlich höher aus (**Tab. III.2.1.5-5**).

Tab. III.2.1.5-5: Nährstoff- und Gärrestmenge V5 (Prüffaktor N und P, Wdh. = 4)

Material	Prüffaktor									
	N					P				
	Prüf-glied Nr.	Stufe g N/ Gefäß	ml GS/ Gefäß	kg N/ ha	m³/ha	Prüf-glied Nr.	Stufe g P/ Gefäß	mlGS/ Gefäß	kg P/ ha	m³/ha
UK	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-
MD	2	0,6	-	193	-	2	0,3	-	97	-
	3	1,2	-	386	-	3	0,6	-	194	-
	4	2,4	-	771	-	-	-	-	-	-
GS-RG	5	0,6	155	"	49	4	0,3	361	"	115
	6	1,2	310	"	99	5	0,6	723	"	230
	7	2,4	620	"	198	-	-	-	-	-
GS-SM	8	0,6	164	"	52	6	0,3	418	"	133
	9	1,2	327	"	104	7	0,6	836	"	266
	10	2,4	654	"	208	-	-	-	-	-
GS-GR	11	0,6	210	"	67	8	0,3	-	"	-
	12	1,2	420	"	134	9	0,6	-	"	-
	13	2,4	840	"	267	-	-	-	-	-

Versuch 6: Asche 2008

Aus den Vergasungsversuchen der CUTEC standen Filteraschen aus Mais-, Roggen- und Grassilagepellets zur Verfügung. Im Vergleich zu den in 2007 eingesetzten Aschen waren die für den Ansatz in 2008 vorgesehenen nährstoffreicher. Der K-Gehalt der Roggenasche lag um 81 % über dem Vorjahreswert, bei der Maisasche waren es 155 %. Tendeziell konnte dies auch bei der P-Konzentration (Roggenasche + 40%, Maisasche + 127 %,) beobachtet werden. Die eingesetzten Mengen (**Tab. III.2.1.5-6**) wurden analog V3 komplett zum Gefäßansatz ausgebracht.

Tab. III.2.1.5-6: Nährstoff- und Aschemenge V4 (Prüffaktor P und K; V6; Wdh. = 4)

Material	Prüf-Glied. Nr.	Prüffaktor							
		P				K			
		Stufe g P/ Gefäß	g AS/ Gefäß	kg P/ ha	t AS/ ha	Stufe g P/ Gefäß	g AS/ Gefäß	kg K/ ha	t AS/ ha
UK	1	0	-	-	-	0	-	-	-
MD	2	0,4	-	127	-	1,5	-	478	-
	3	0,8	-	255	-	3,0	-	955	-
	4	1,2	-	382	-	4,5	-	1433	-
	5	1,6	-	510	-	6,0	-	1911	-
AS-RG	6	0,4	21	"	7	1,5	14	"	5
	7	0,8	43	"	14	3,0	28	"	9
	8	1,2	64	"	21	4,5	42	"	14
	9	1,6	86	"	27	6,0	57	"	18
AS-SM	10	0,4	38	"	12	1,5	41	"	13
	11	0,8	76	"	24	3,0	82	"	26
	12	1,2	114	"	36	4,5	124	"	39
	13	1,6	153	"	49	6,0	165	"	53
AS-GR	14	0,4	38	"	12	1,5	17	"	5
	15	0,8	77	"	24	3,0	34	"	11
	16	1,2	115	"	37	4,5	51	"	16
	17	1,6	154	"	49	6,0	68	"	22

III.2.2 Ergebnisse und Diskussion

Ein wesentliches Kriterium zur Beurteilung der Nährstoffwirkung von Presssäften stellt das Mineraldüngeräquivalent (MDÄ) dar. Das MDÄ beschreibt die Düngewirkung eines oder mehrerer Nährelemente der zu prüfenden organischen Düngestoffe im Vergleich zu einem Mineraldünger. Das MDÄ kann sowohl auf Ertragsbasis als auch auf der Grundlage des Nährstoffentzuges berechnet werden. Das Mineraldüngeräquivalent berechnet sich als Quotient des Ertrages der Mineraldüngervariante (E_{MD}) und der organischen Variante (E_{OD}) gegenüber der ungedüngten Kontrolle (E_{UK}) erzielter Mehrerträge wie folgt:

$$MDÄ\ \% = \frac{E_{OD} - E_{UK}}{E_{MD} - E_{UK}} * 100$$

In der nachstehenden Ergebnisbetrachtung wurde der rechnerisch ermittelte Mehrertrag in Form des Ertrags-MDÄ bewertet. Durch die komplexe Wirkung der Prüfsubstrate konnten aufgrund anderer ertragsfördernder Wirkungen höhere Erträge als in den Mineraldüngervarianten erreicht werden. Ursachen sind Nebenwirkungen der Prüfsubstrate, deren weitere Quantifizierung im Rahmen des Projektes nicht möglich war. Wurden Mineraldüngeräquivalente, bedingt durch den methodischen Ansatz von über 100 % errechnet, war die Düngewirkung des Nebenproduktes gleich der der Mineraldüngerwirkung zu setzen, d. h. für ökologische und ökonomische Kalkulationen konnte maximal ein MDÄ von 100 % angerechnet werden. Die Darstellung negativer MDÄ unterblieb.

III.2.2.1 Versuch 1: Presssaft 2007

Nach einem gleichmäßigen Aufgang zeigten sich im Vegetationsverlauf bei allen mit Presssaft gedüngten Varianten Wachstumsunterschiede der Roggenpflanzen gegenüber den Mineraldüngervarianten. Die negativen Entwicklungsdifferenzen nahmen deutlich mit steigender Düngergabe zu (**Abb. III.2.2.1-1**). Dieser Effekt verstärkte sich nach der ersten und zweiten Nachdüngung deutlich. In den hohen Düngungsstufen bildeten sich Chlorosen, welche später mehr oder weniger stark nekrotisierten. Obwohl in allen Varianten Ähren ausgebildet wurden, blieben die Pflanzen insbesondere in den Roggen- und Graspresssaftvarianten stark wachstumsreduziert und reagierten mit Notreife. Kleine Ähren und verkümmerte Körner waren die Folge.



Abb. III.2.2.1-1: Entwicklung der Versuchspflanzen 48 Tage nach Gefäßansatz, 12 Tage nach erster Nachdüngung (V1 N), 1 = UK, 5 = MD, 0,6 g N

N-Versuch

Bei der zuerst angebauten Fruchtart (Roggen) konnte von den mit Presssaft gedüngten Varianten gegenüber der UK im Prüfglied 8 (PS-SM 0,6 g/N) mit 99 % der höchste Relativertrag gegenüber der UK erzielt werden (**Abb. III.2.2.1-2**). Im Vergleich dazu lag der Ertrag der Mineraldüngung im Prüfglied 2 (0,6 g N) bei 124 % und im Prüfglied 4 (2,4 g N) bei 147 %. Wegen niedriger Erträge in den Presssaftvarianten blieb ein Großteil der Nährstoffe im Boden ungenutzt zurück. Dem Mais als Zweitfrucht gelang es, dieses Potenzial auszuschöpfen, so dass sich die aufsummierten Erträge (Roggen + Mais) innerhalb der verschiedenen Düngungsstufen in den Presssaftvarianten annäherten. Besonders deutlich wird der Zuwachs im Prüflied 13 (PS-GR 2,4 g/N), wo ein Mehrertrag (nur Mais) gegenüber der UK erreicht wurde. Die Erträge des Maises lagen in allen Presssaftvarianten über denen der UK und der MD. Gleiches gilt für die Erträge von Gras, welches als dritte und letzte Fruchtart angebaut wurde. Im N-Versuch konnten vier Grasschnitte realisiert werden.

Innerhalb der Fruchtfolge aufsummiert, konnte im Vergleich zur Mineraldüngervariante bei der Presssaftdüngung mit steigender N-Menge kein Mehrertrag erzielt werden.

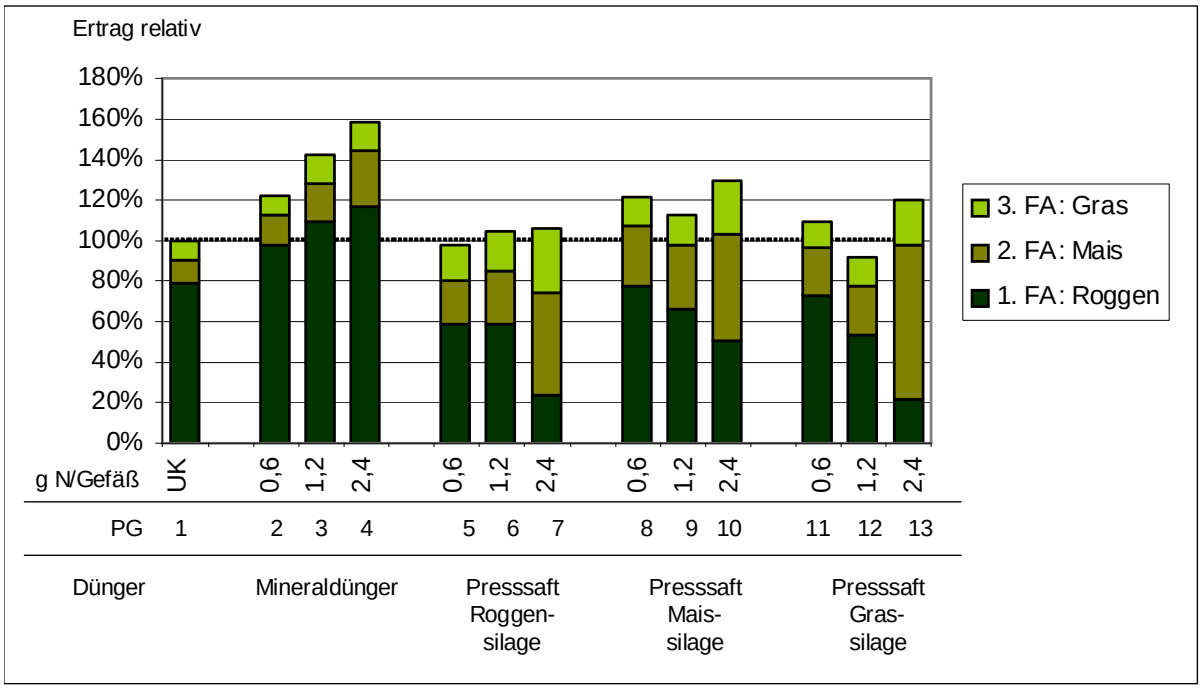


Abb. III.2.2.1-2: Fruchtfolgeertrag relativ in % der UK, Bezugsbasis TM, V1 - PS - N

Die Presssäfte unterschieden sich im Hinblick auf die MDÄ-Wirkung wenig (**Tab. III.2.2.1-1**). Das höchste N-MDÄ (93 %) erreichte Maispresssaft im PG 8 (SM, 0,6 g N/Gefäß). Bei Düngung mit Gras- bzw. Roggenpresssaft lagen die maximalen N-MDÄ bei 40 bzw. 12 %.

Tab. III.2.2.1-1: MDÄ, V1 - PS – N

Substrat	PS-RG			PS-SM			PS-GR		
Prüfglied (PG)	5	6	7	8	9	10	11	12	13
g N/Gefäß	0,6	1,2	2,4	0,6	1,2	2,4	0,6	1,2	2,4
MDÄ Ertrag %	-	12	9	93	31	50	40	-	35

P-Versuch

Analog zum N-Versuch stagnierte das Pflanzenwachstum mit steigender Presssaftgabe der ersten Fruchtart auch im P-Versuch. Mais, im Versuch als zweites Fruchtfolgeglied angebaut, verfügt über ein schlechteres P-Aneignungsvermögen und reagiert stark auf P-Mangel (Lütke Entrup, Oehmichen, 2000). Daher wurde in der unbehandelten Kontrolle ein deutlich geringerer Ertrag gegenüber den anderen Prüfgliedern erzielt. In Prüfgliedern, in denen weniger P durch die Vorfrucht Roggen entzogen wurde, reagierte der Mais mit höheren Erträgen. Die Nachwirkung des Phosphors kam besonders bei der dritten Fruchtart (Gras) zum Tragen (**Abb. III.2.2.1-3**).

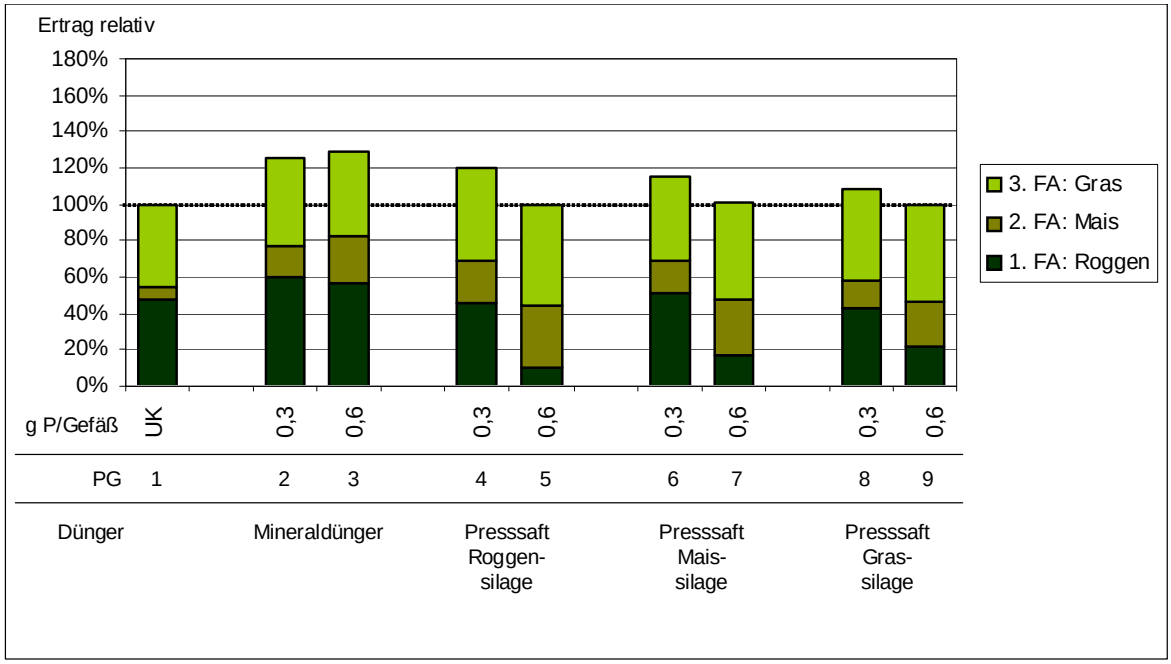


Abb. III.2.2.1-3: Fruchtfolgeertrag relativ in % der UK, Bezugsbasis TM, V1 - PS - P

Die beim Roggen aufgetretenen extremen Pflanzenschädigungen und Ertragsdefizite in der hohen (0,6 g P/Gefäß) mit Presssaft gedüngten Varianten konnten durch die Folgefrüchte nicht mehr aufgeholt werden. In diesen Varianten wurde keine Ertragswirkung durch Presssaft-düngung nachgewiesen. Demgegenüber traten in der niedrigeren Düngungsstufe (0,3 g P/Gefäß) P-MDÄ von 77% (PS-RG), 62 % (PS-SM) und 35 % (PS-Gras) auf (**Tab. III.2.2.1-2**). Im P-Versuch erfolgte eine dreifache Schnittnutzung des Grases.

Tab. III.2.2.1-2: MDÄ, V1 - PS – P

Substrat	PS-RG		PS-SM		PS-GR	
Prüfglied (PG)	4	5	6	7	8	9
g P/Gefäß	0,3	0,6	0,3	0,6	0,3	0,6
MDÄ Ertrag %	77	0	62	1	35	1

III.2.2.2 Versuch 2: Presssaft 2007

N-Versuch

Während in V1 mit der Erstfrucht in keiner Variante die Erträge über denen der UK lagen, konnten in den Prüfgliedern 8, 11 und 12 relative Mehrerträge (110 %, 111 % und 105 %) durch Mais- bzw. Graspresssaft in V1 erreicht werden. In der mit Roggenpresssaft gedüngten Variante verliefen die Ertragsdepressionen mit zunehmender Düngermenge am stärksten (**Abb. III.2.2.2-1**).

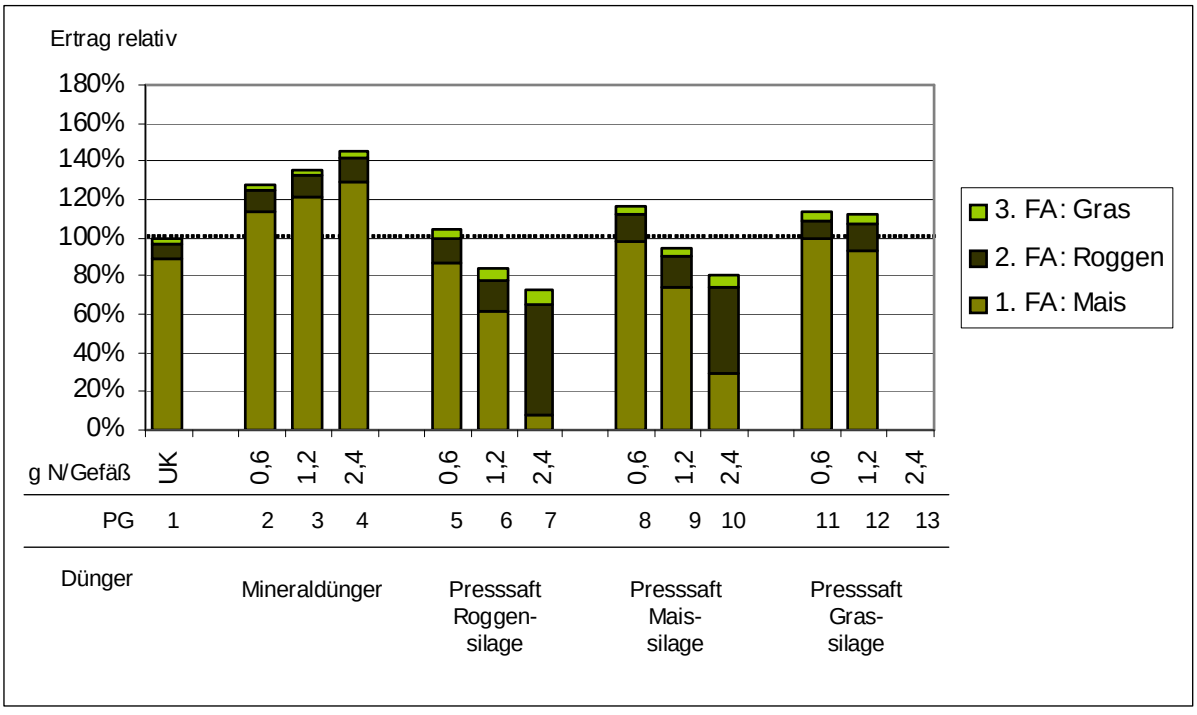


Abb. III.2.2.2-1: Fruchtfolgeertrag relativ in % der UK, Bezugsbasis TM, V2 - PS - N

In den Prüfgliedern 11 (PS-GR; 0,6 g N/Gefäß) und 12 (PS-GR; 1,2 g N/Gefäß) trat nur ein geringer Ertragsunterschied auf. Als zweite Fruchtart schöpfte der Roggen die v. a. in den Prüfgliedern 7 (PS-RG; 2,4 g N/Gefäß) und 10 (PS-GR; 2,4 g N/Gefäß) noch vorhandenen Stickstoffreserven aus. Wie auch in V1 erreichte PG 8 (PS-SM; 0,6 g N/Gefäß) das höchste MDÄ (60 %) (**Tab. III.2.2.2-1**). Geringer war die Düngewirkung des Graspresssaftes mit einem MDÄ von 48 % bei 0,6 g N/Gefäß. Der Roggenpresssaft entsprach mit dem MDÄ 16 % in der 0,6er Stufe etwa dem besten Ergebnis aus V1 mit 12 % in der 1,2er Stufe.

Tab. III.2.2.2-1: MDÄ, V2 - PS – N

Substrat	PS-RG			PS-SM			PS-GR		
Prüfglied (PG)	5	6	7	8	9	10	11	12	13
g N/Gefäß	0,6	1,2	2,4	0,6	1,2	2,4	0,6	1,2	2,4
MDÄ Ertrag %	16	-	-	60	-	-	48	35	-

P-Versuch

Die Mehrerträge der Presssaftvarianten und die errechneten P-MDÄ in der Düngungsstufe 0,3 g P/Gefäß sind deshalb so hoch, weil der Mehrertrag der Mineraldüngervariante in diesem Jahr niedrig ausfiel, d. h., MDÄ-Werte der Presssäfte von über 150 % bedeuten gute P-Wirkung bei pflanzenverträglichen PS-Mengen. Die Düngungsstufe 0,6 g P/Gefäß war nicht auswertbar, da die Presssaftdüngung zum extremen Pflanzenschädigungen bzw. Ertragsausfällen beim Mais führte (**Abb. III.2.2.2-2**).

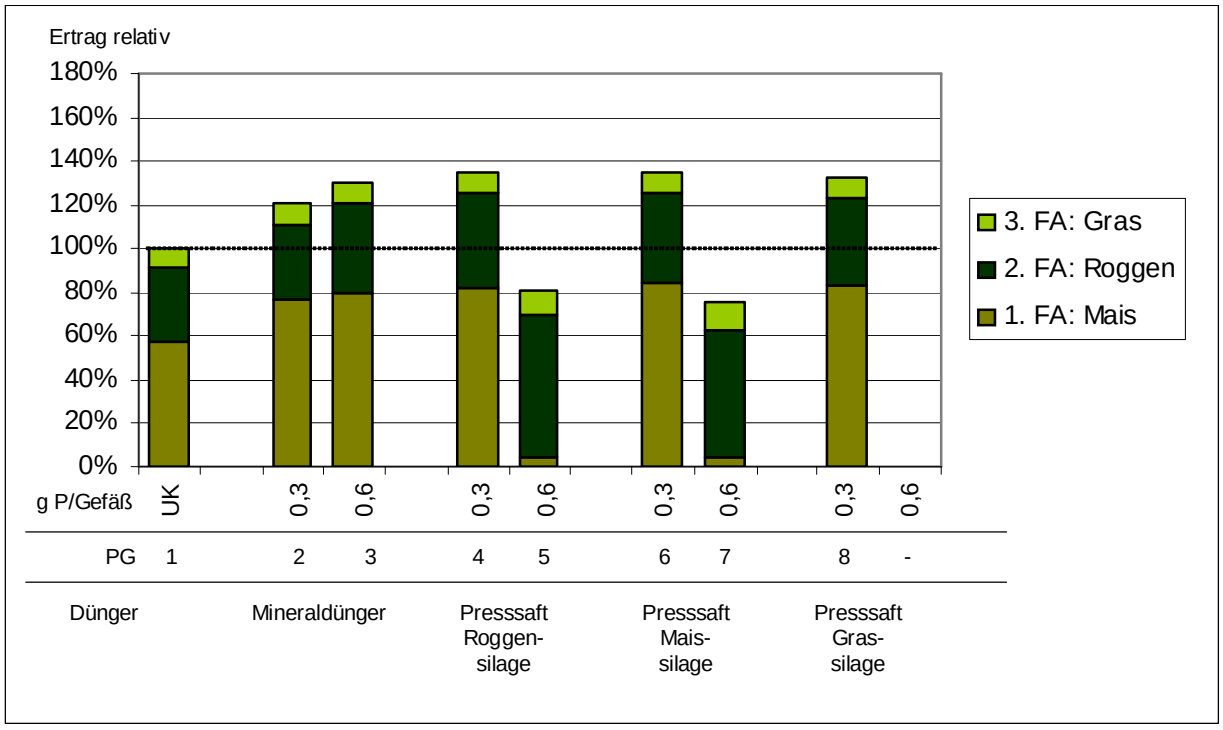


Abb. III.2.2.2-2: Fruchtfolgeertrag relativ in % der UK, Bezugsbasis TM, V2 - PS - P

Aus den Ergebnissen (**Tab. III.2.2.2-2**) abgeleitet, scheint Mais in der Lage zu sein den Phosphor aus dem Presssaft besser zu nutzen als den Phosphor im Mineraldünger. Beim Gras als dritte Fruchtart konnte nur eine Schnittnutzung erfolgen.

Tab. III.2.2.2-2: MDÄ, V2 - PS – P

Substrat	PS-RG		PS-SM		PS-GR	
Prüfglied (PG)	4	5	6	7	8	9
g P/Gefäß	0,3	0,6	0,3	0,6	0,3	0,6
MDÄ Ertrag %	171	-	167	-	158	-

Diskussion zu den Ergebnissen der Versuche 1 und 2

Ähnlich dem Silosickersaft (**Tab. III.2.2.2-3**) sind die untersuchten Presssäfte (**Tab. III.2.1.5-2**) durch eine hohe elektrische Leitfähigkeit und einen hohen Anteil leicht abbaubarer organischer Substanzen gekennzeichnet. Erstere basiert auf dem niedrigen pH-Wert (hohe H+-Ionenkonzentration) und kann osmotische bzw. ionenspezifische Schädigungen an der Pflanze hervorrufen (Knoblauch, 1990). Durch den hohen Gehalt osmotisch wirksamer Substanzen (el. LF) wird das notwendige Wasserpotenzialgefälle zwischen Bodenlösung und Wurzelzelle vermindert, wodurch die Wasseraufnahme in die Wurzel erschwert wird. Infolgedessen beginnen die Pflanzen zu welken. Außerdem wird angegeben, dass der Ertrag der meisten Pflanzen vermindert wird, wenn die Bodenlösung in der Wurzelzone eine elektrische Leitfähigkeit von 4.000 bis 8.000 µS/cm aufweist. In Zusammenhang mit Versuchen von Knoblauch ist dies bei Silosickersaft mit hohen Konzentrationen (> 20.000 µS/cm) der Fall. Presssaft ist ebenfalls durch einen hohen Gehalt an leicht abbaubaren organischen Substanzen (BSB_5: 50.000 bis 100.000 mg O_2/l) gekennzeichnet. Nach Eintrag des Presssaftes in den Boden wird dieser schnell mikrobiell abgebaut, so dass anaerobe Bedingungen im Wurzelraum entstehen. In der Folge treten Sauerstoffmangel und eine Schädigung des Wurzelwachstums auf.

Knoblauch fand heraus, dass die Silosickersaftausbringung von 251 bzw. 345 m1 je Gefäß zwischen BBCH 09 und 11 zum Absterben einzelner Roggenpflanzen führte. Auf Grund der Bestockungsfähigkeit des Roggens wurde die anfangs beobachtete Schädigung teilweise kompensiert. Die im BioLog-Versuch unmittelbar nach der Einarbeitung der Presssäfte eingepflanzten Roggenpflänzchen zeigten bereits bei Presssaftmengen ab 165 ml (1. Gabe, PS Silomais, 2. N-Stufe) Beeinträchtigungen im Wachstum. Jede weitere Gabe (Summe: 230 ml) verstärkte diese Symptome. In den Versuchen von Knoblauch nahm der Trockenmasseertrag von Roggen bei Ausbringung zur Bestockung mit steigender Silosickersaftmenge (63, 157, 251, 345 ml/Gefäß) signifikant zu.

Die Ausbringung von Silosickersaft zum Mais nahm Knoblauch u. a. unmittelbar vor der Maisaussaat vor. Mit steigenden Gaben verzögerte sich der Aufgang. Nach 17 Tagen war der Unterschied allerdings statistisch nicht mehr erkennbar. Es konnte ein signifikanter Mehrertrag bei steigender Presssaftgabe (157, 251, 345, 439 ml/Gefäß) nachgewiesen werden. Der Sickersafteinsatz vier Wochen vor der Maissaussaat erwies sich als günstigste Variante.

Zwischen den BioLog-Presssäften (**Tab III.2.1.5-2**) und den von Knoblauch verwendeten Sickersäften gibt es deutliche Unterschiede. So liegen die BSB_5-Werte der Presssäfte deutlich über denen der Sickersäfte und deutlich über dem in der Literatur aufgeführten Grenzwert von 50.000 bis 100.000 mg O_2/l. Ebenfalls deutlich höher sind die CSB-Werte der Presssäfte. Der CSB-Wert gibt Auskunft über die Menge Sauerstoff, die zur Oxidation der gesamten im Wasser enthaltenen organischen Stoffe verbraucht wird. Die hohen BSB_5 und CSB-Werte könnten vor allem bei hohen Ausbringungsmengen eine Ursache für die negative Ertragswirkung der

Presssäfte gegenüber den Sickersäften sein. Die Presssäfte weisen außerdem deutlich höhere N-, P- und Ca-Gehalte auf. Hingegen sind die Na-Gehalte deutlich geringer als in den Sickersäften. Die Mg-, K- und Cl-Gehalte sind ähnlich.

Tab. III.2.2.2-3: Merkmale von Silosickersaft

		Angaben aus TLL Merkblatt		
Inhaltsstoff	Maßeinheit	Mittelwert	Minimum	Maximum
TS	%	5,7	2,0	10
OTM	%	3,7	2,0	8,5
pH-Wert	-	4,8	3,6	5,1
BSB_5[3]	mg O_2/Liter	57.400	13.800	100.000
Elektr. Leitfähigkeit	µS/cm	20.000	16.000	38.000
Gesamt-N	mg/l	1.900	200	6.000
NH_4-N	mg/l	1.100	200	3.000
P	mg/l	600	< 10	1.500
K	mg/l	3.300	500	8.700
Ca	mg/l	9.00	100	1.600
Mg	mg/l	300	< 100	1.000
Na	mg/l	700	200	2.200
Cl	mg/l	8.800	< 100	32.000

III.2.2.3 Versuch 4: Presssaft

Das Ziel dieses Versuches bestand darin, die negativen Wirkungen, die bei der Anwendung des Presssaftes aus 2006 (**Tab. III.2.1.5-2**) in den bisherigen Versuchen aufgetreten sind (V und V2), durch geeignete Maßnahmen abzuschwächen. Um dem sehr niedrigen pH-Wert der Presssäfte als mögliche Ursache für Wachstumsdegressionen entgegenzuwirken, wurde eine Versuchsserie mit $CaCO_3$-Zugabe zum Boden angelegt. In einer weiteren Serie erfolgte die Presssaftausbringung deutlich (4 Wochen) vor der Aussaat, um die natürlichen Puffereigenschaften des Bodens zur Erstellung eines Gleichgewichtes[4] zwischen Boden und Presssaft positiv zu nutzen. Generell ist festzustellen, dass mit steigenden N-Gaben vor allem in der Mineraldüngervariante aber auch bei den Presssäften über alle Versuchsserien die TM-Erträge deutlich anstiegen. Auf dem Versuchsboden „Dachwig“ mit den Substraten aus 2007/2008 konnten keine negativen Wachstumseinflüsse durch Presssaftanwendung ermittelt werden.

a) Presssaft - Splitting ohne Zumischung von $CaCO_3$ in Boden

Der höchste Relativertrag gegenüber der unbehandelten Kontrolle wurde in der Düngungsstufe 0,6 g N/Gefäß beim Prüfglied 11 (PS-GR) mit 218 % festgestellt (**Abb. III.2.2.3-1**). Der Ertrag bei der mineralischen Düngung lag auf einem ähnlichen Niveau. In den Düngungsstufen 1,2

[3] BSB_5 = Biologischer Sauerstoffverbrauch, Sauerstoffmenge die von Mikroorganismen zum Abbau organischer und biologischer Stoffe innerhalb von 5 Tagen bei einer Temperatur von 20 ℃ benötigt wird
[4] Die exakte Definition des Gleichgewichtszustandes erfordert umfangreiche Bodenuntersuchungen (Zeitreihen), die im Rahmen des Projektes nicht durchgeführt werden konnten

und 2,4 g N/Gefäß schnitt die Presssaftdüngung mit Roggen am besten ab, es konnten N-Mineraldüngeräquivalente von 72 bzw. 96% erzielt werden.

b) Presssaft - Splitting mit Zumischung von $CaCO_3$ in Boden

Die Ertragsentwicklung auf dem mit $CaCO_3$ behandelten Boden (**Abb. III.2.2.3-1**) verlief ähnlich, aber mit etwas geringeren Erträgen im Vergleich zur Referenzvariante (PS ohne besondere Maßnahmen). Auch in dieser Variante lagen die mit Roggenpresssaft gedüngten Varianten in den Düngungsstufen 0,6 und 1,2 deutlich vorn.

Ein positiver Effekt durch Kalkung konnte in diesem Beispiel nicht verzeichnet werden. Die Ursache hierfür lag u. a. in den hohen Erträgen der Referenzvariante. Vermutlich können sogar N-Verlusten durch die Kalkung aufgetreten sein.

c) Presssaft - gesamte Menge 4 Wochen vor Saat ausgebracht

Die Erträge der Presssaftvarianten in Versuchsserie c lagen in den meisten Fällen (Prüfglieder: 6, 9 bis 13) über denen der Versuchsserie b (**Abb. III.2.2.3-1)**. Etwas höhere Erträge gegenüber der Referenzserie konnten nur in den Prüfgliedern 6, 8, 12 und 13 erzielt werden. Wobei im PG 12 mit 117 % relativ gegenüber der Referenzserie (a) die maximalste Ertragsdifferenz erreicht wurde (**Tab. III.2.2.3-1)**. Die Maßnahme, die gesamte Menge zwei Wochen vor der Saat auszubringen, hat nur teilweise zu höheren Erträgen geführt.

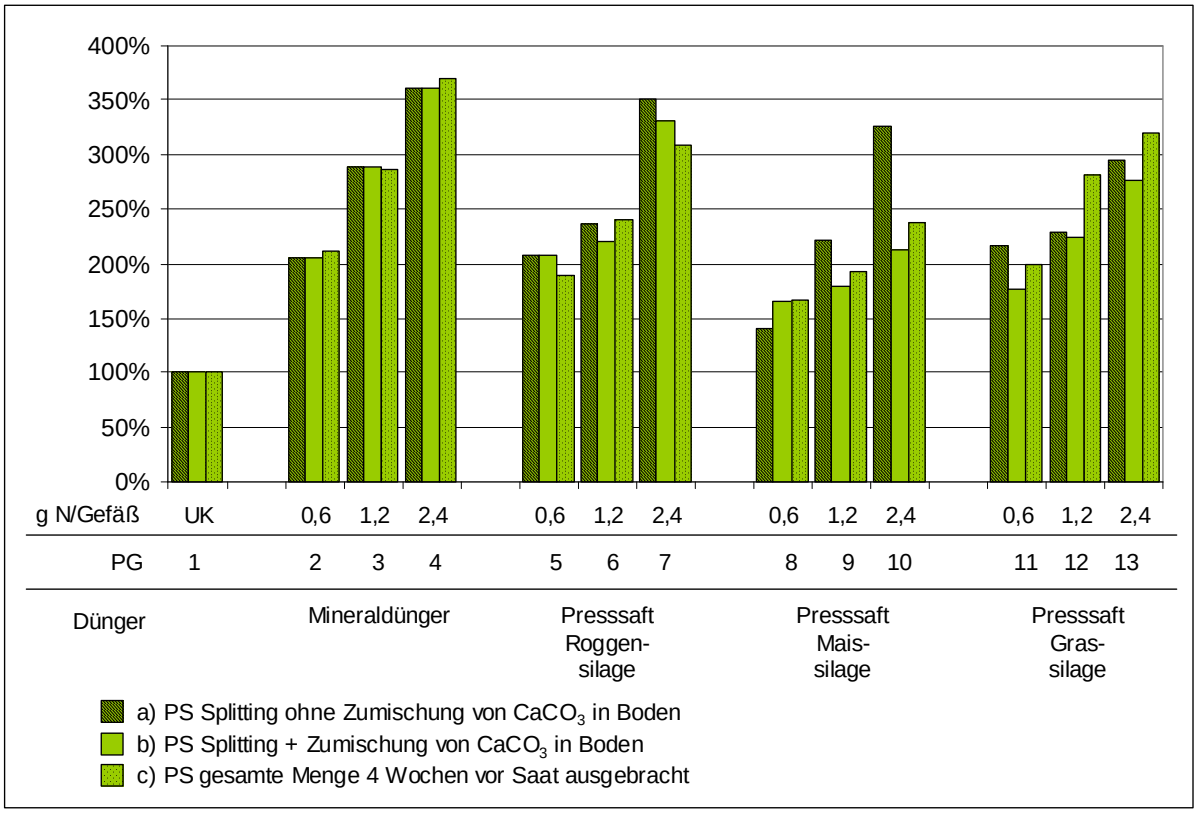


Abb. III.2.2.3-1: Fruchtfolgeertrag relativ in % der UK, Bezugsbasis TM, V4 - PS - N

Tab. III.2.2.3-1: MDÄ, V4 - PS – N

Substrat	PS-RG			PS-SM			PS-GR		
Prüfglied (PG)	5	6	7	8	9	10	11	12	13
g N/Gefäß	0,6	1,2	2,4	0,6	1,2	2,4	0,6	1,2	2,4
a) MDÄ Ertrag %	87	72	96	38	64	86	113	69	74
b) MDÄ Ertrag %	103	63	88	62	41	43	74	65	67
c) MDÄ Ertrag %	79	75	77	59	50	51	83	97	81

Diskussion zu den Presssaftversuchen V1, V2 und V4

In den Versuchen 3 und 4, in denen der Presssaft des Jahres 2007 zur Anwendung kam, fielen die Erträge in der zuerst angebauten Fruchtart (Roggen V1 bzw. Mais V2) unabhängig vom eingesetzten Presssaft mit steigender Gabenhöhe ab. Ursache hierfür waren Pflanzenschädigungen in Form von Chlorosen und Nekrosen. Den Folgefrüchten gelang es, das im Boden vorhandene Potenzial zu nutzen und Ertragsdefizite zu kompensieren. Auf Grundlage der Ergebnisse aus den Versuchen 3 und 4 sollte die negative Presssaftwirkung durch Zugabe von $CaCO_3$ bzw. Ausbringen des kompletten Presssaftes vier Wochen vor der Aussaat abgeschwächt werden. Gegensätzlich zu den Erkenntnissen der vorangegangenen Presssaftversuche auf dem Misch- bzw. unverschnittenen „Wengelsdorfer"-Boden zeigten die ersten Pflanzen in den hohen Düngungsstufen auf dem mit Sand vermischten Boden in V4 entsprechende Erträge. Auf Grundlage der in den drei Versuchsserien gewonnenen Ergebnisse konnte die beste Wirkung (MDÄ 113 %) gegenüber der Mineraldüngervariante bei Düngung mit Graspresssaft in Versuch 4, im Prüfglied 11 bei 0,6 g N/Gefäß erreicht werden. Roggenpresssaft erzielte das beste N-MDÄ ebenfalls in Versuch 4 im Prüfglied 5 (0,6 g N/Gefäß) mit 103 %. Durch Düngung mit Maispresssaft im Versuch 2 in der Düngungsstufe 0,6 g N/Gefäß konnte, nach drei Fruchtarten, ein N-MDÄ von 93 % nachgewiesen werden. Mit 171 % wurde das höchste P-MDÄ für Graspresssaft in Versuch 2 bei 0,3 g P/Gefäß erreicht. Bei Düngung mit Maispresssaft wurde ein P-MDÄ von 158 % in Versuch 2, Düngungsstufe 0,6 g P/Gefäß ermittelt. Bei Düngung mit Roggenpresssaft betrug das höchste P-MDÄ 77 % (Versuch 1, Stufe 0,3 g P/Gefäß). Die unterschiedliche Ertragswirkung der Versuche 3 und 4 gegenüber dem Versuch 4 könnte im Presssaft liegen, dieser war in V1 und V2 identisch. Für V4 wurden andere Presssäfte verwendet. Weiterhin ist ein Einfluss des Bodens denkbar. Dieser war in V4 durch höhere Puffereigenschaften und einen höheren Anteil an organischer Substanz gekennzeichnet.

Bei der praktischen Ausbringung der Presssäfte ist von einer Aufwandmenge zwischen 10 und 30 m³/ha auszugehen. Dies entspricht in Abhängigkeit der Inhaltsstoffe einer Nährstoffzufuhr von 30 bis 70 kg N/ha bei Stickstoff und von 5 bis 20 kg P/ha bei Phosphor. Die methodisch bedingten Ausbringungsmengen im Gefäßversuch (**Tab. III.2.1.1-2**) basieren auf einem höheren Nährstoffentzug der Versuchspflanzen im Gefäß gegenüber dem Freiland. Bisherige Untersuchen mit Silosickersäften haben gezeigt, dass bei dessen Anwendung vor dem Auflaufen Wuchsschäden während der Jungpflanzenentwicklung auftreten können. Deshalb wird empfohlen, Silosickersaft mit einer elektrischen Leitfähigkeit von über 25 mS/cm nicht unverdünnt anzuwenden. Höchste empfohlene Aufwandmengen bei einer maximalen elektrischen Leitfähigkeit von ≤ 25 mS/cm betragen laut (TLL, 2005) 50 m³/ha zu Futterroggen, 80 m³/ha zu Mais (Hauptfrucht), 50 m³/ha zu Mais (Zweitfrucht), 40 m³/ha je Aufwuchs Ackergras, 30 m³/ha zu Grünland und 30 m³/ha zu Getreidestrohdüngung. Die direkte

Ausbringung von Presssaft ist allerdings nicht zu favorisieren da es günstigere Alternativen gibt, wie das gemeinsame Ausbringen mit Gülle (pH-Wert-Absenkung, im Projekt nicht untersucht) oder die Vergärung in der Biogasanlage zur Erzeugung von Strom und Wärme.

III.2.2.4 Versuch 5: Gärrückstand 2008

N-Versuch

Die Erträge aus den mit Gärrest gedüngten Varianten bewegen sich durchweg auf dem Niveau der Mineraldüngervarianten. Der Ertrag in der unbehandelten Kontrolle liegt deutlich hinter denen der anderen Prüfglieder (**Abb. III.2.2.4-1**). Zwischen den Presssäften sind kaum Unterschiede hinsichtlich der N-Wirkung erkennbar. Die MDÄ liegen im Bereich von 91 bis 114 % (**Tab. III.2.2.4-1**). Der hohe NH_4-Anteil im Gärrückstand ist Indiz für eine schnelle N-Verfügbarkeit. Die untersuchten Gärreste weisen, bezogen auf Nt, Ammonium-N-Gehalte von 67 % bei Roggengärrest, 68 % bei Maisgärrest und 78 % bei Grasgärrest auf. Von den bisher bekannten und untersuchten organischen Düngemitteln kommen Gärreste aus tierischen Exkrementen bzw. Nachwachsenden Rohstoffen den Gärresten auf Presssaftbasis am nächsten (pH-Wert, NH4-Anteil). Die hohe N-Verfügbarkeit spiegelt sich in hohen Erträgen der Gärrestvarianten wider. Es werden MDÄ von 91 bis 114 % errechnet. In der Literatur (Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, 2008) werden für Gärprodukte (Gülle, Festmist, Nawaro) Mineraldüngeräquivalente mit einer Sofortwirkung von ebenfalls > 100% (108 bis 121 %) ausgewiesen.

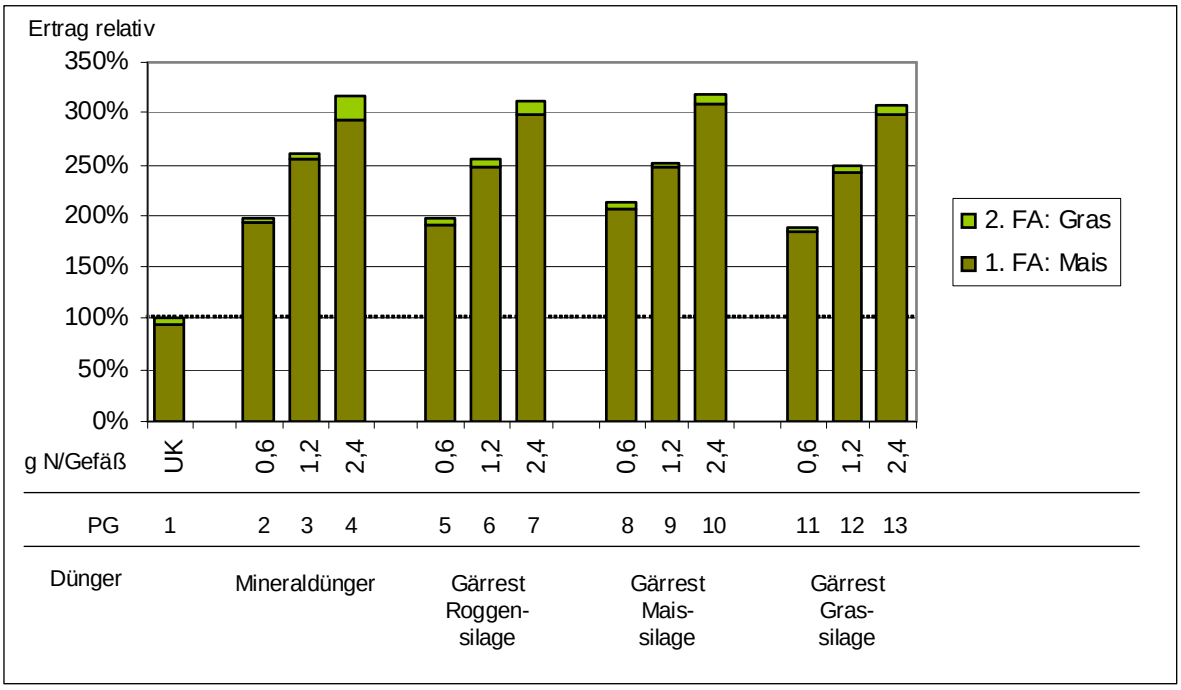


Abb. III.2.2.4-1: Fruchtfolgeertrag relativ in % der UK, Bezugsbasis TM, V5 - GS - N

Tab. III.2.2.4-1: MDÄ, V5 - GS – N

Substrat	GS-RG			GS-SM			GS-GR		
Prüfglied (PG)	5	6	7	8	9	10	11	12	13
g N/Gefäß	0,6	1,2	2,4	0,6	1,2	2,4	0,6	1,2	2,4
MDÄ Ertrag %	99	98	97	114	95	101	91	92	96

P-Versuch

Im P-Versuch blieben die mit Gärrest gedüngten Pflanzen von Vegetationsbeginn an stark im Wachstum zurück.

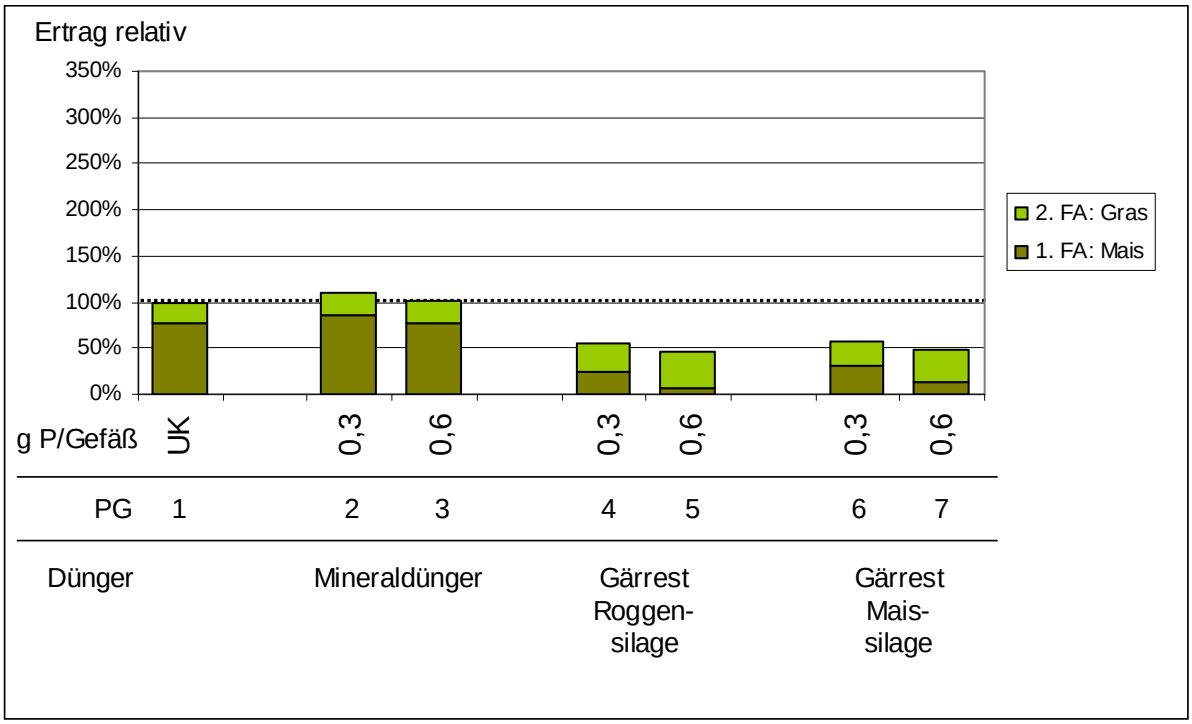


Abb. III.2.2.4-2: Fruchtfolgeertrag relativ in % der UK, Bezugsbasis TM, V5 - GS - P

Es wurden mit der ersten Fruchtart nicht einmal die Erträge der unbehandelten Kontrolle erreicht (**Abb. III.2.2.4-2**). Es wird deshalb auf die Darstellung der Mineraldüngeräquivalente verzichtet, der Versuch ist nicht auswertbar.

III.2.2.5 Versuch 3: Asche 2007

P-Versuch

Mit den geprüften Düngungsstufen der Mineraldüngervariante konnten auf diesem Boden sowohl bei den einzelnen Fruchtarten als auch in der Summe hohe Mehrerträge bis über 50 % durch P-Düngung erzielt werden **(Abb. III.2.2.5-1)**. Der Maximalertrag wurde bereits auf der ersten Stufe 0,4 g P/Gefäß erreicht. Die Erträge der ersten Fruchtart (Mais) lagen in den Prüfgliedern 6 bis 9 (Asche aus Roggenpellets) und 10 bis 11 (Asche aus Maispellets) zwischen dem Ertragsniveau der unbehandelten Kontrolle und dem Ertragsniveau der Mineraldüngervarianten. Die Erträge in den mit Maisasche gedüngten Prüfgliedern sanken bei hohen Düngergaben in den Prüfgliedern 12 und 13 stark ab. Als Ursache hierfür ist die hohe Aschemenge anzusehen, welche durch die geringeren Inhaltsstoffe gegenüber der

Roggenasche bedingt ist (vgl. **Tab. III.2.1.1-3**). Ab einem Aschegehalt von ca. 200 g/Gefäß konnten diese negativen Erscheinungen beobachtet werden.

Auf die Folgefrüchte Roggen und Gras hatten die Aschemengen keinen Einfluss mehr.

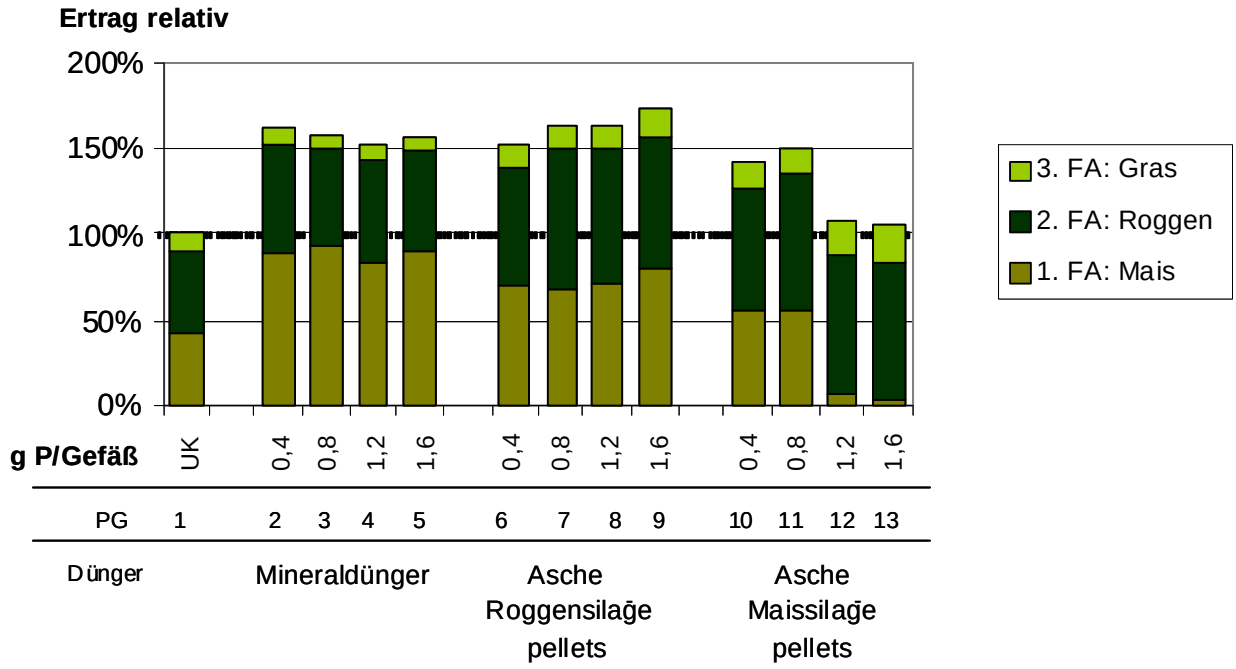


Abb. III.2.2.5-1: Fruchtfolgeertrag relativ in % der UK, Bezugsbasis TM, V3 - AS - P

Die höchsten Mineraldüngeräquivalente konnten bei Düngung mit Roggenasche von 85 bis 127 % (**Tab. III.2.2.5-1**) erreicht werden. Ursache für errechnete P-MDÄ > 100 % kann möglicherweise in einer weiteren Boden-P-Mobilisierung durch den hohen Kalkgehalt der Asche sein.

Tab. III.2.2.5-1: MDÄ, V3 - AS – P

Substrat	AS-RG				AS-SM			
Prüfglied (PG)	6	7	8	9	10	11	12	13
g P/Gefäß	0,4	0,8	1,2	2,4	0,4	0,8	1,2	2,4
MDÄ Ertrag %	85	108	121	127	66	85	16	9

K-Versuch

In der K-Mineraldüngervariante war kaum (von PG 2 auf PG 3) bzw. nur ein geringer Ertragsanstieg (von PG 3 auf PG 4, von PG 4 auf PG 5) mit steigender Düngermenge zu registrieren. Die Mehrerträge gegenüber der ungedüngten Kontrolle liegen im Bereich von 25 bis 30 %. Die Erträge der mit Roggenasche gedüngten Varianten nahmen mit steigender K-Menge leicht zu (PG 6 bis 9 in **Abb. III.2.2.5-2**) und bewegten sich auf dem Niveau der Mineraldüngervarianten. Wie bereits im P-Versuch beobachtet, brach der Ertrag bei der Maisaschedüngung ab dem 12. Prüfglied zusammen. Der Höchstertrag gegenüber der MD-

Vergleichsvariante bei Roggenaschedüngung wurde in PG 7 und bei Maisaschedüngung im PG 10 erzielt.

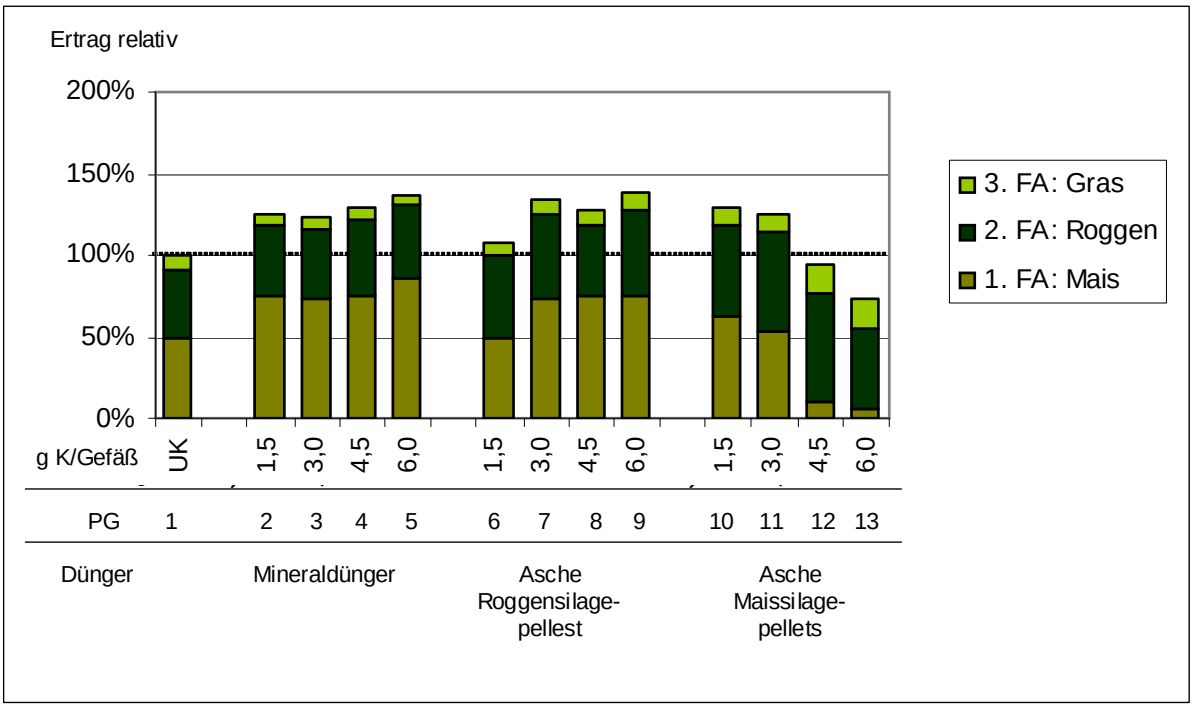


Abb. III.2.2.5-2: Fruchtfolgeertrag relativ in % der UK, Bezugsbasis TM, V3 - AS - K

Die K-MDÄ erreichten sowohl bei der Roggen- als auch bei der Silomaisasche, hier nur in der geringen Düngungsstufe, 100 % und mehr (**Tab. III.2.2.5-2**).

Tab. III.2.2.5-2: MDÄ, V3 - AS – K

Substrat	AS-RG				AS-SM			
Prüfglied (PG)	6	7	8	9	10	11	12	13
g K/Gefäß	1,5	3,0	4,5	6,0	1,5	3,0	4,5	6,0
MDÄ Ertrag %	31	146	99	102	118	107	-	-

III.2.2.6 Versuch 6: Asche 2008

P-Versuch

Im Versuch 6 reagierte der Mais auf dem Gemisch aus „Dachwiger“ Boden und Sand deutlicher auf die Mineraldüngergaben als im Versuch 3 (V3: Mehrerträge von durchschnittlich 100 % gegenüber UK). Bei der Düngung mit Roggenasche liegen die Erträge, über die vier Düngungsstufen hinweg, auf einem ähnlich hohen Niveau (156 bis 173 % Relativertrag, **Abb. III.2.2.6-1**). In Varianten mit vergleichbaren Mengen an Mais- und Grasaschen (vgl. **Tab. III.2.1.5-6**), sanken die Erträge mit zunehmender Düngergabe. Der Höchstertrag wurde in diesen beiden Varianten jeweils in der ersten Düngungsstufe (0,4 g P/Gefäß) mit einem Relativertrag gegenüber der UK von 161 bzw. 132 % erreicht.

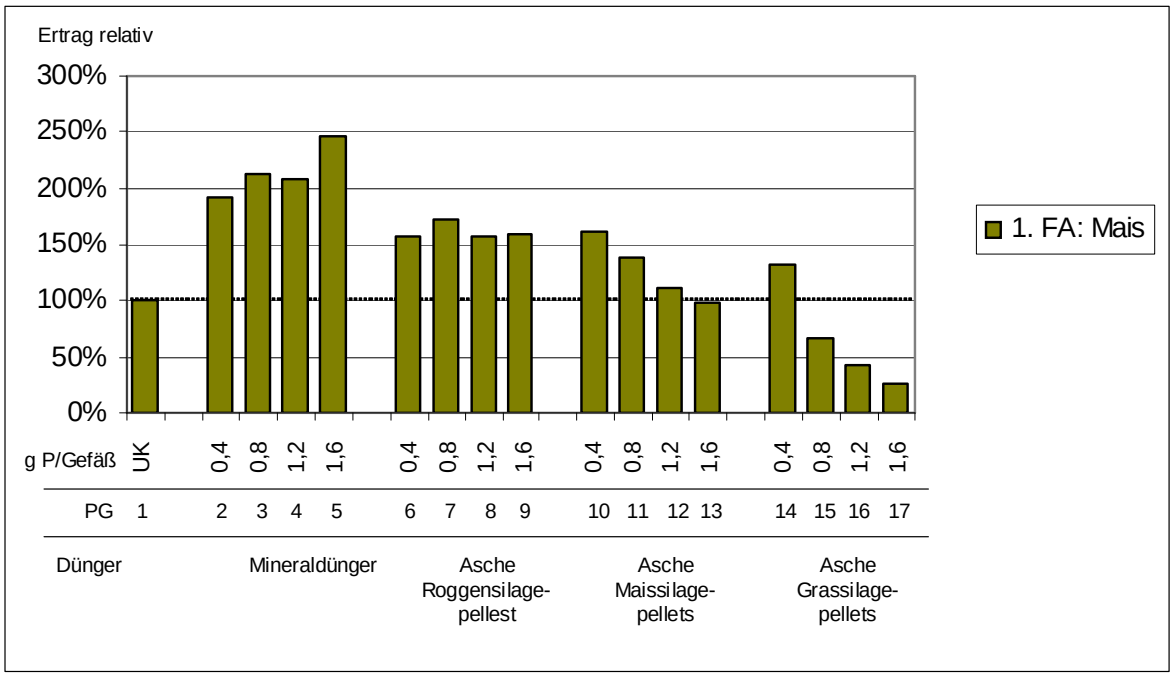


Abb. III.2.2.6-1: Fruchtfolgeertrag relativ in % der UK, Bezugsbasis TM, V6 - AS - P

Es konnte für Roggenasche ein maximales MDÄ von 65 % ermittelt werden. Bei Mais- und Grasasche betrug dieses 66 bzw. 34 %. Für abschließende Aussagen müsste durch den Anbau von Folgefrüchten die Nachwirkung untersucht werden.

Tab. III.2.2.6-1: MDÄ, V6 - AS – P

Substrat	AS-RG				AS-SM				AS-GR			
Prüfglied (PG)	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
g P/Gefäß	0,4	0,8	1,2	2,4	0,4	0,8	1,2	2,4	0,4	0,8	1,2	2,4
MDÄ Ertrag %	61	65	52	40	66	36	10	-1	34	-29	-53	-50

K-Versuch

Die mit Roggenasche gedüngte Variante erreichte in jeder Stufe Mehrerträge gegenüber der unbehandelten Kontrolle (**Abb. III.2.2.6-2**). Die MDÄ bewegten sich im Bereich von 33 bis 62 %. In den Gefäßen, in denen Maisasche eingesetzt wurde, blieben die Erträge wegen der hohen Aschemengen (**Tab. III.2.1.5-6**) deutlich unter dem Niveau der unbehandelten Kontrolle. Grasasche zeigte in den Prüfgliedern 14 und 15 Erträge über bzw. auf dem Niveau der UK. Die ermittelten MDÄ lagen bei 81 bzw. 3 % (**Tab. III.2.2.6-2**).

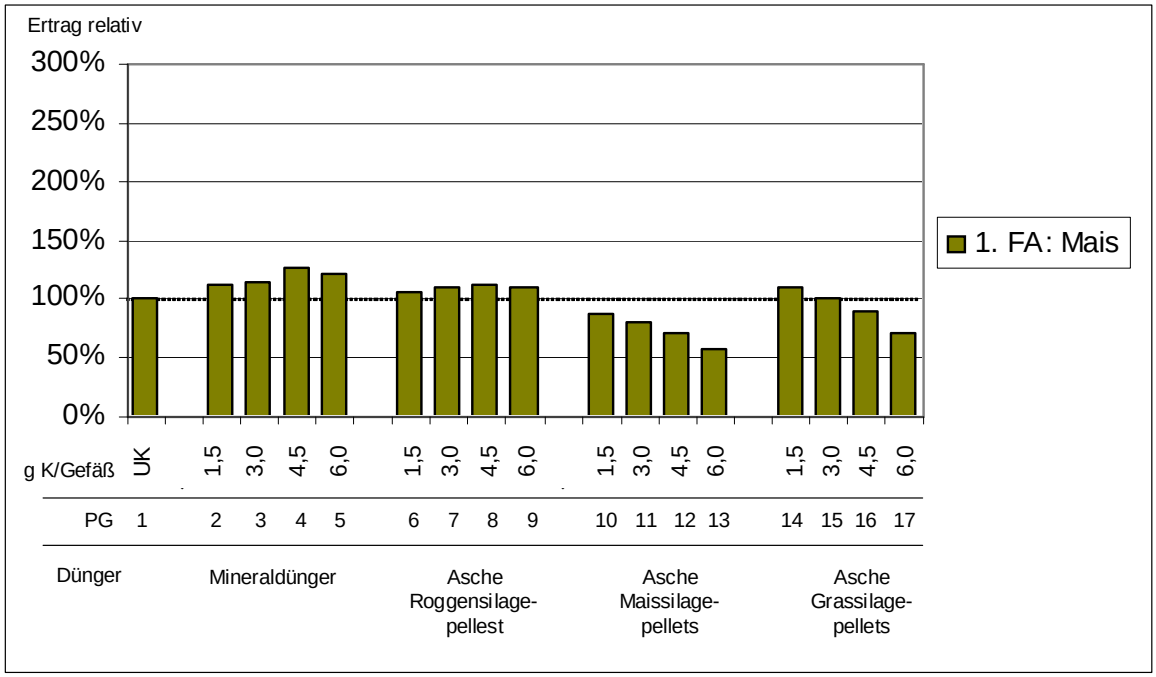


Abb. III.2.2.6-2: Fruchtfolgeertrag relativ in % der UK, Bezugsbasis TM, V6-AS-K

Tab. III.2.2.6-2: MDÄ, V6 - AS - K

Substrat	AS-RG				AS-SM				AS-GR			
Prüfglied (PG)	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
g P/Gefäß	1,5	3,0	4,5	6,0	1,5	3,0	4,5	6,0	1,5	3,0	4,5	6,0
MDÄ Ertrag %	33	62	46	45	-	-	-	-	81	3	-	-

Diskussion zu den Ascheversuchen V3 und V6

Kennzeichnend für die eingesetzten Aschen sind in beiden Versuchen der hohe pH-Wert (11,5 bis 12,4), der hohe Anteil **b**asisch **w**irksamer **B**estandteile (BWB: 33 bis 58 % $CaCO_3$) sowie eine daraus resultierende hohe Reaktivität. Die basische Wirksamkeit ist ein Maß für das Neutralisationspotenzial und wird durch die Menge an Säure ausgedrückt, die von der Mengeneinheit Düngekalk bzw. im vorliegenden Fall Asche neutralisiert wird. Die Angabe erfolgt in Form des Neutralisationsäquivalents. Die Reaktivität wird gemessen an der Menge HCl, die verbracht wird, um eine Suspension des Kalkes 10 Minuten beim pH-Wert 2 zu halten. Sie kennzeichnet die Wirkungsgeschwindigkeit.

Da der Kalk als CaO vorliegt, ist dieser nahezu vollständig umsetzbar. Neben der geprüften P- und K-Wirkung der Aschen ist aus Sicht der Nährstoffverfügbarkeit auch von einer Eignung als Kalkdünger auszugehen. Besonders auf sauren Böden kann von einer guten Kalkwirkung zur Absenkung des pH-Wertes ausgegangen werden.

Im Versuch 6 steht die Prüfung der Nachwirkung für P und K noch aus.

III.2.3 Überlegungen zur praktischen Düngung mit BioLog-Nebenprodukten

Grundsätzlich ist für die im BioLog-Projekt untersuchten Nebenprodukte (Presssäfte, Gärrückstände, Aschen) zu klären, ob ein Einsatz als Düngemittel sowohl aus rechtlicher als auch aus technologischer Sicht denkbar ist. Im Folgenden soll kurz auf mögliche Probleme aufmerksam gemacht werden, es wird kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben.

Den rechtlichen Rahmen zur Herstellung und Anwendung von Düngemitteln stellt das Abfall- und Düngemittelrecht, in dessen Geltungsbereich u. a. das Düngemittelgesetz (DüngMG) (DüngMG, 1977), die Düngemittelverordnung (DüMV) (DüngMV, 2008), Düngeverordnung (DüV) (DüV, 2007), Bioabfallverordnung (BioAbfV) (BioAbfV, 1998) und die Klärschlammverordnung (AbfKlärV) (AbfKlärV, 1992) liegen.

Laut § 1 DüngMG sind Düngemittel „…Stoffe, die dazu bestimmt sind, unmittelbar oder mittelbar Nutzpflanzen zugeführt werden, um ihr Wachstum zu fördern, ihren Ertrag zu erhöhen oder ihre Qualität zu verbessern…“. Nach § 1a Nr. 1 dürfen „…Düngemittel nur nach guter fachlicher Praxis angewandt werden. Die Düngung nach guter fachlicher Praxis dient der Versorgung der Pflanzen mit notwendigen Nährstoffen sowie der Erhaltung und Förderung der Bodenfruchtbarkeit…“. „Düngemittel die nicht als EG-Düngemittel bezeichnet sind, dürfen gewerbsmäßig nur in den Verkehr gebracht werden, wenn sie einem Düngemitteltyp entsprechen, der durch Rechtsverordnung … zugelassen ist“ (DüngMV § 2 Nr. 1). In der DüMV werden die Anforderungen an die Zulassung von Düngemitteltypen konkretisiert.

Für den unvergorenen Presssaft muss zunächst geprüft werden, ob dieser im Rahmen der DüMV als Wirtschaftsdünger deklariert werden kann. Dem wäre so, wenn Presssaft als „landwirtschaftlich erzeugte Biomasse“ eingeordnet wird. Silosickersaft, der ähnliche Eigenschaften wie der Presssaft aufweist, kann als Wirtschaftsdünger nach den Restriktionen für flüssige Wirtschaftdünger ausgebracht werden (TLL, 1998).

Weiterhin sollte geprüft werden, in wie weit ein gemeinsamer Einsatz von Gülle und Presssaft sinnvoll sein kann. Beispielsweise bewirkt eine Zugabe von Silosickersaft zu Gülle die Absenkung des pH-Wertes (pH-Wert Gülle: 6,5 bis 8,0; Presssaft: 3,8 bis 4,4) und somit die Reduktion von Ammoniakverlusten. Mit der Deklaration des Presssaftes als Wirtschaftsdünger dürfte auch die düngemittelrechtliche Einstufung der Biogasgülle als Wirtschaftsdünger möglich sein. Informationen zu rechtlichen Aspekten des Einsatzes von Gärrückständen aus der Biogaserzeugung in der Landwirtschaft sind dem Merkblatt der TLL (2005) zu entnehmen. Ebenfalls ist die Einstufung der Aschen zu einem Düngemitteltyp zu prüfen.

Nach DüMV § 3 dürfen Düngemittel nur zugelassen werden, wenn sie einem nach Anlage 1 DüMV festgelegten Düngemitteltyp entsprechen und „…bei sachgerechter Anwendung die Fruchtbarkeit des Bodens, die Gesundheit von Menschen, Haustieren und Nutzpflanzen nicht schädigen und den Naturhaushalt nicht gefährden. …für die Herstellung …b) organische Ausgangsstoffe … nur nach Maßgabe der Anlage 2 Tabelle 7 verwendet werden. Um einem Düngemitteltypen nach Anlage 1 zu entsprechen, müssen die in dieser Anlage definierten Mindestgehalte an Nährstoffen eingehalten werden. Tabelle 7 der Anlage 2 (DüMV) gibt an, welche Ausgangsstoffe/Stoffgruppen oder Herkunft die Ausgangsstoffe von Düngemitteln besitzen dürfen. In Tabelle 7 DüMV sind unter 7.3 (mineralische Stoffe), Aschen aus pflanzlichen Stoffen …aus der Energiegewinnung … aufgeführt, mit dem Hinweis „Ohne Aschen aus der letzten Stufe im Rauchgasweg“. Ergänzend werden folgende Maximalwerte für den Siebdurchgang angegeben: bei 0,1 mm max. 0,2 %, bei 0,05 mm max. 0,05 %, bei

0,01 mm max. 0,005%. Eine weitere Zulassungsvoraussetzung eines Düngemitteltypes besteht gemäß DüMV § 3 Nr. 3 darin, dass in Düngemitteln … die Grenzwerte der in **Tab. III.2.3.-1** aufgeführten Schadstoffe nicht überschritten werden.

Tab. III.2.3-1: Schadstoffe von „BioLog-Aschen“ und Grenzwerte/ Kennzeichnung nach DüMV

	ME	DüMV[5]	Asche von Pellets aus Silage von:					
			RG		MS		GS	
			Untersuchungsjahr					
			2007	2008	2007	2008	2007	2008
As	mg/kg TM	40 / 20	5,10	3,27	2,97	1,62		3,99
Pb	mg/kg TM	150 / 100	<20	<20	24,1	<20		<20
Cd	mg/kg TM	1,5 / 1,0	0,21	0,072	0,95	0,11		0,06
Cd für DM ab 5% P_2O_5	mg/kg P_2O_5	20 / 50	-	-	-	-		-
Cr	mg/kg TM	- / 300	56,7	7701	123	54,5		58,5
Cr VI	mg/kg TM	2 / 1,2	-	-	-	-		-
Ni	mg/kg TM	80 / 40	36,2	50,4	58,2	28,5		35,2
Hg	mg/kg TM	1,0 / 0,5	<0,0005*	<0,0015*	<0,0005*	<0,0015*		<0,0015*
Tl	mg/kg TM	1,0 / 0,5	<0,025*	<0,0040*	0,081	<0,0040*		<0,0040*
PFT	mg/kg TM	0,1 / 0,05	-	-	-	-		-

Untersuchungsmethode: RFA
*mg/kg FM; - keine Angabe bzw. keine Untersuchung durchgeführt

Die untersuchten Aschen hielten die Schadstoffgrenzwerte der DüMV ein. Bei Nickel konnte in zwei Fällen (Roggenasche 2008 und Maisasche 2007) eine Überschreitung der Kennzeichnungsgrenze festgestellt werden. Bei Cadmium lag die Maisasche aus 2007 knapp unter der Kennzeichnungsgrenze.

III.2.4 Zusammenfassung Gefäßversuche

Wie in der Zielstellung formuliert, sollten die Versuche zu einer ersten Abschätzung der Düngewirkung dienen. Folgende Schlüsse lassen sich zusammengefasst aus den bisherigen Versuchsergebnissen ableiten:

- → Die in den Nebenprodukten enthaltenen Inhaltsstoffe sind in einem Umfang vorhanden, der eine Anwendung als Düngemittel rechtfertig (**Tab. III.2.4-1**).
- → Die Ausbringungsmenge ist abhängig von der Nährstoffkonzentration und somit auch von der Pflanzenart, aus der die Pellets produziert sind.
- → Hohe Ausbringungsmengen haben im Gefäßversuch z. T. zu Schädigungen der ersten Fruchtart geführt. Eine praktische Düngung ist demzufolge erst dann möglich, wenn die zuerst mit Presssaft, Asche oder Gärrest gedüngte Fruchtart keine negativen Wachstumserscheinungen und folglich Mindererträge im

[5] DüMV, Anlage 2, Tabelle 1.4; Grenzwert / Kennzeichnung ab …

Freiland aufweist. Versuche auf Praxisflächen sind deshalb unbedingt erforderlich, um die Reaktion der Pflanzen zu testen.

→ Bei Ausbringung pflanzenverträglicher Mengen werden z. T. hohe Mineraldüngeräquivalente erzielt. Anhand der bisher in den Gefäßversuchen ermittelten Ergebnisse folgende MDÄ als Faustwerte für die ökonomische und ökologische Begleitforschung abgeschätzt:

- Presssaft (RG, SM, GR)
  - N: Ø 75 %, Schwankungsbreite 50 – 100%
  - P: Ø 80 %, Schwankungsbreite 60 – 100%
- Gärrest (RG, SM, GR)
  - N: Ø 95 %, Schwankungsbreite 90 – 100 %
  - P keine Aussage möglich
- Asche (RG, SM, GR)
  - K: Ø 75 %, Schwankungsbreite 50 – 100%
  - P: Ø 80 %, Schwankungsbreite 60 – 100%
  - Die düngemittelrechtliche Einordnung der Nebenprodukte muss noch geprüft werden.

→ Es liegen keine Erfahrungen zur praktischen Ausbringung, insbesondere bei Presssaft (Sedimentationsverhalten) und Aschen (Streuverhalten) vor.

→ Die Bodenart scheint einen Einfluss auf die Pflanzenverträglichkeit zu haben.

→ Für abgesicherte Aussagen ist weitere Forschungsarbeit nötig.

Tab. III.2.4-1: Nährstoffgehalte der untersuchten Nebenprodukte

Element	Einheit	Substrat		
		Presssaft (n=6)	Gärrest (n=3)	Asche (n=5)
N	kg/m³ bzw. t	3,4 – 6,7	2,8 – 3,9	-
P	kg/m³ bzw. t	0,5 – 1,9	0,7 – 0,8	4,5 – 18,6
K	kg/t	5,1 – 10,2	4,8 – 6,4	14,4 – 110,0
CaO	kg/t	0,7 – 2,4	0,6 – 1,2	83,0 – 296,0

III.3 Ökonomie vom Anbau bis zum Pellet

Der zweite Arbeitsschwerpunkt bestand in der Kostenberechnung für Energiepflanzenpellets aus Roggen-, Gras- und Maissilage ab Produktionsanlage (PA). Die zu betrachtende Prozesskette erstreckt sich vom Energiepflanzenanbau bis hin zur Pelletabgabe auf das Transportmittel ab Pelletierwerk. Ebenfalls wurde die Wärme- und Stromgewinnung aus der Vergärung der Presssäfte und die Verstromung des Biogases im BHKW als direkt an die Pelletproduktion gekoppelter Arbeitsschritt berücksichtigt. Auf Basis definierter Produktionskapazitäten sollten Kosteneffekte zwischen verschiedenen Anlagengrößen dargestellt werden. Die Anlagenauslegung orientierte sich an definierten Parametern, die vor Beginn der Berechnungen fixiert werden mussten. Primär handelte es sich hierbei um quantitative (Mengenanfall- und Zusammensetzung) sowie um qualitative Rohstoff- bzw. Silageeigenschaften (TM-Gehalte und Verarbeitungseignung). Anhand der Flächenstruktur und der zu erwartenden Erträge wurde die mögliche Rohstoffbereitstellung für ein begrenztes Einzugzugsgebiet abgeschätzt. Diese Arbeit ist als begleitende Randbetrachtung zu verstehen, auf die im Bericht nicht weiter eingegangen wird.

III.3.1 Material und Methoden

III.3.1.1 Fruchtarten: Auswahl und Erträge

Die Auswahl und der Umfang der untersuchten Fruchtarten unterlag einerseits den Anforderungen der Praxisversuche, geeignetes Pflanzenmaterial in der benötigten Größenordnung zur Verfügung zu stellen und andererseits der Forderung Pflanzen auszuwählen, die für das Zweikulturnutzungssystem (Graß, Scheffer, 2005) geeignet sind. Nach den Grundsätzen dieses Systems soll auf geeigneten Standorten ein Anbau von zwei Hauptfrüchten innerhalb eines Jahres mit hohen Erträgen möglich sein. Da Roggen und Mais die genannten Vorgaben erfüllen, wurden sie als Untersuchungspflanzen ausgewählt. In Anbetracht der angestrebten, beachtlichen Verarbeitungsmengen war eine Versorgung über das so genannte grüne Band anzustreben. Aus diesem Grund fiel die Auswahl der dritten Fruchtart auf Gras (Ackergras/Grünland), welches durch einen frühen Erntetermin und mehrere Ernten im Jahr zur Entzerrung von Arbeitsspitzen beiträgt. Die unterstellten Erträge der genannten Kulturen orientierten sich entsprechend an den Ertragserwartungen des Zweikulturennutzungssystems. Hierfür wurden aus den bisherigen Ergebnissen des EVA-Projekts (Gödeke, Vetter, 2005, Vetter, 2006, FNR 2008) Erträge geeigneter Standorte als Datengrundlage abgeschätzt. Die unterstellten Erträge lassen sich nur auf Gunststandorten, d. h. mit ausreichend Niederschlägen (Richtwert > 600 mm/a) und ertragsfähigen Böden (Richtwert AZ > 40) erzielen.

III.3.1.2 Anlagengrößen und Massenfluss

Die Auswirkungen verschiedener Anlagengrößen auf den Flächenbedarf erfolgten anhand der Abschätzung in einer Modellregion (Beck, Vetter 2008). Neben ausreichend Niederschlägen und einem entsprechenden Ertragspotential des Bodens waren weitere Bedingungen zu erfüllen. So sollte der Flächenbedarf zur Rohstoffbereitstellung möglichst minimal und die

Infrastruktur durch kurze und einfache Transportwege gekennzeichnet sein. Im Ergebnis dieser Vor- bzw. Randbetrachtung kristallisierte sich Niedersachsen, insbesondere die Region um Hannover heraus. Abgeleitet aus dem Verhältnis von Ackerland (80 % AF an der LF) und Grünland (20 % GF an der LF) in der ausgewählten Region wurden 20 % der Fläche zur Erzeugung von Gras- und 80 % zur Erzeugung von Roggen- bzw. Silomaissilage unterstellt. Die Größe des Einzugsgebietes richtete sich nach der maximal zulässigen Transportentfernung (Unterstellung: 15 km) für landwirtschaftliche Transportgespanne (Schlepper). Als Kriterium für die Flächeninanspruchnahme wurde in Anlehnung an Fritsche (2004) ein Anteil für Fläche zur Erzeugung von Biomasse (Biogas, Biodiesel, Bioethanol, BtL usw.) von 26 % an der LF zu Grunde gelegt. Außerdem sollte als Obergrenze für den Maisanbau ein Flächenanteil von 33 % an der LF nicht überschritten werden. Obwohl Mais mit sich selbst verträglich ist, sprechen das vermehrte Auftreten des Maiszünslers, des Maisbeulenbrandes und Fusarien gegen einen unbegrenzten Anbau. Ein Problem könnte in Zukunft das verstärkte Auftreten des Westlichen Maiswurzelbohrers werden. Gegen hohe Anteile einer Fruchtart in der Fruchtfolge sprechen zudem arbeitswirtschaftliche Gründe. Verschiedene Arten mit unterschiedlichen Bestell- und Erntezeiträumen führen zur Entzerrung von Arbeitsspitzen und minimieren Ernterisiken.

III.3.1.3 Ökonomischen Bewertung

Rohstoffbereitstellung

Die Berechnung der Herstellungskosten von Energiepflanzenpellets erfolgte für drei ausgewählte Anlagengrößen. Bei der Festlegung des Preises für den Substratmix von 95 €/TM_{SL} wurde das Kostenverhältnis der drei Silagearten berücksichtigt. Für GPS-Silage liegen die Kosten ca. 10 bis 15 % und für Grassilage ca. 25 bis 40 % über denen von Maissilage (LfL, 2008). Für die Berechnung der Silagebereitstellungskosten wurde die KTBL-Datensammlung *Betriebsplanung Landwirtschaft 2008/09* (KTBL, 2008) und die betriebswirtschaftlichen Richtwerten der TLL (TLL, 2007b, 2004) verwendet. Durch regionale Gegebenheiten wie das Pachtpreisniveau und die Konkurrenz um Futterflächen in viehstarken bzw. biogasreichen Gebieten sind Substratpreise starken Schwankungen unterworfen. Des Weiteren wirken sich verändernde Betriebsmittelpreise (Reinhold, 2007) wie z. B. für Diesel, Dünger und Pflanzenschutzmittel und die mit Marktfrüchten erzielbaren Hektarerlöse auf die Substratkosten aus.

Da die Transportkosten für das Erntegut von der Größe des Einzugsgebietes abhängig sind, erfolgte eine getrennte Kostenbetrachtung. Analog zur Silier- und Lagerlogistik „großer“ Biomasseanlagen wurde unterstellt, dass eine Silagelagerung am Trocken- bzw. Pelletierwerk möglich ist. Beeinflusst von vielen Faktoren richtet sich die Transportentfernung u. a. nach der Infrastruktur und der für den Biomasseanbau zur Verfügung stehenden Fläche im Einzugsgebiet der Produktionsanlage. Die Transport- und Lagerkosten wurden ebenfalls nach KTBL-Daten und TLL-Richtwerten berechnet. Detaillierte Ergebnisse über die Untersuchungen zur Bereitstellung qualitätsgerechter Silagen werden im BioLog-Abschlussbericht des ATB (Idler, Fürl, Schemel, 2008) dargestellt.

Produktion von Energiepflanzenpellets und Vergärung der Presssäfte

Die Berechnung der Produktionskosten von Energiepflanzenpellets bezog sich auf den Produktionsprozess zwischen Biomasseeingang in die Produktionsanlage bis zum Ausgang der Pellets aus der Produktionsanlage. Da die Biogasanlage, entsprechend dem Modellansatz, fester Bestandteil im Produktionssystem ist, wird sie an dieser Stelle ebenfalls betrachtet.

Die Kosten wurden entsprechend ihrer Entstehungsart als kapital-, verbrauchs-, betriebsgebunden und sonstige ausgewiesen (VDI, 1996).

Zur Berechnung der kapitalgebundenen Kosten wurde, basierend auf den in den Technikumsversuchen ermittelten Daten, das Investitionsvolumen für großtechnische Anlagen durch die Anlagenhersteller Amandus Kahl und Anhydro berechnet (Up-Scaling). In den kapitalgebundenen Kosten sind enthalten: Die Investitionskosten (Afa) für die Produktionsanlage zur Pelletherstellung (Entwässerungs-, Trocknungs- und Pelletieranlage), die Gebäudekosten, die Kosten der Pelletlagerung und die Kosten der Biogasanlage einschließlich des Gärrestlagers. Entsprechend der DüV (DüV, 2007) betrug die Kapazität des Gärrestlagers 180 Tage.

Aus Expertenbefragungen (Projektpartner, Anlagenbetreiber) konnten Daten zu den betriebsgebundenen Kosten für Bedienung und anlagenerhaltende Maßnahmen erhoben werden.

Die verbrauchsgebundenen Kosten ergaben sich aus dem Energieverbrauch für Wärme und Strom sowie deren Preis. Während die Verbrauchskennzahlen in Technikumsversuchen ermittelt wurden (siehe Abschlussberichte Kahl, Anhydro und ATB (Scholz, u. a., 2008)), sind für die Energieträger in Absprache mit den Projektpartnern folgende Preisannahmen für Großabnehmer getroffen worden: Wärme: 0,05 €/kWh, Strom: 0,12 €/kWh.

Nicht enthalten sind Kosten für die Genehmigung (vgl. Fischer, Jahrhaus, Heinrich, 2008), Planungskosten, welche nicht den Produktionsbereich betreffen sowie Kosten die bei der Durchführung von Explosionsschutzmaßnahmen und der Geländeerschließung anfallen.

Die in der Biogasanlage aus den vergorenen Presssäften erzeugte Wärme soll dem Trocknungsprozeß zugeführt werden. Für die Verwertung des BHKW-Stroms boten sich die zwei Nutzungsmöglichkeiten „Eigennutzung“ oder „Einspeisung nach EEG mit und ohne KWK-Bonus“ (**Abb. III.3.1.3-1**) an (TLL 2009 a, EEG, 2008).

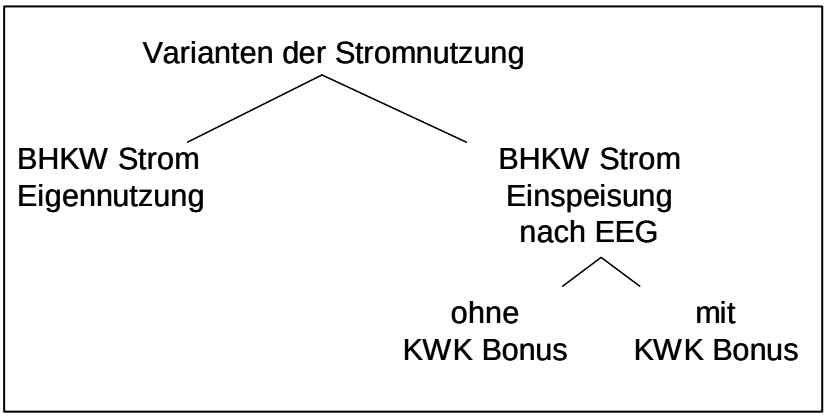


Abb. III.3.1.3-1: Nutzungsmöglichkeiten von „BHKW Strom“

Berechnungsgrundlage dieser Varianten waren die Vergütungssätze des EEG von 2009, bei einer unterstellten Inbetriebnahme der BGA in 2009. Da die Kosten der Biogasanlage in die Gesamtkosten der Pelletproduktion eingingen, erfolgte eine kostenneutrale Bewertung des Presssaftes als Gärsubstrat. Diese Vorgehensweise galt auch für die im BHKW erzeugte und intern genutzte Wärme- bzw. Strommenge. Einzelwerte zum Methanbildungspotenzial der Presssäfte sind dem BioLog-Abschlussbericht des vTI zu entnehmen.

Mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse sollte aufzuzeigen werden, wie sich Parameterveränderungen auf den Pelletpreis auswirken.

Verwertung der Nebenprodukte

Bewertungsgrundlage zur Ermittlung der Nährstoffwerte und Ausbringungskosten von Presssäften, Gärresten und Aschen bildeten nachstehend aufgeführte Ergebnisse der Gefäßversuche zur pflanzenbaulichen Nutzung der Nebenprodukte:

Presssaft (RG, SM, GR)	→ N: Ø 75 %, Schwankungsbreite 50 – 100%
	→ P: Ø 80 %, Schwankungsbreite 60 – 100%
Gärrest (RG, SM, GR)	→ N: Ø 95 %, Schwankungsbreite 90 – 100 %
	→ P keine Aussage möglich
Asche (RG, SM, GR)	→ K: Ø 75 %, Schwankungsbreite 50 – 100%
	→ P: Ø 80 %, Schwankungsbreite 60 – 100%

Für die P-Wirkung des Gärsubstrates konnte kein MDÄ abgeleitet werden. Da die Wirkung des Phosphors erst im Nachbau zu erwarten ist, wird in Anlehnung an die Presssaftversuche ein MDÄ von 80 % unterstellt.

Zur Bewertung des Nährstoff- bzw. Düngewertes wurden folgende Mineraldüngerpreise (TLL, 2009 b) unterstellt:

Stickstoff	=	1,00 € je kg N
Phosphor	=	1,32 € je kg P
Kalium	=	0,47 € je kg K
Magnesium	=	0,34 € je kg K
Kalk	=	0,09 € je kg Ca.

Für Nährstoffe, die nicht im Gefäßversuch untersucht werden konnten, jedoch in größeren Mengen enthalten sind, erfolgte eine 100 %ige Anrechnung. Da noch keine düngemittelrechtliche und technologische Einordnung der Nebenprodukte stattgefunden hat, ist die hier vorgenommene Bewertung als theoretischer Ansatz zu werten. Vor dem Hintergrund der Ausbringung zu Düngungszwecken dürfte die Applikationsfähigkeit des Gärrestes wegen ähnlicher physikalischer Eigenschaften zu bekannten Gärresten am ehesten gegeben sein. Für die Berechnung der Ausbringungskosten nach KTBL und TLL-Richtwerten wurde der Einsatz schlagkräftiger Technik unterstellt. Sollte Presssaft mit der gleichen Technologie auszubringen sein, gelten bei identischer Gabenmenge die gleichen Rückführungskosten in €/m³ wie für die Gärreste.

Als Transportentfernung zur Rückführung der Nebenprodukte galten die Annahmen der Substratzulieferung von 5,5 km für $PA_{12.500}$[6], 7,5 km für $PA_{25.000}$ und 10,5 km für $PA_{50.000}$. Da die Asche in der zentralen Konversationsanlage anfallen soll, müssen hier andere Transportentfernungen, möglicherweise bis zu > 100 km zu Grunde gelegt werden.

III.3.2 Ergebnisse und Diskussion

III.3.2.1 Fruchtarten: Auswahl, Erträge und Substrateigenschaften

Zur Abschätzung des Flächenbedarfs und der Massenströme wurde für Roggen als Erstfrucht ein Ertrag von 11 t_{TM}/ha, für Mais als Zweitfruchtfrucht von 9 t_{TM}/ha und für Gras von 9 t_{TM}/ha angenommen. Die in **Tab. III.3.2.1-1** dargestellten Substrateigenschaften basieren auf Mittelwerten von Versuchsdaten aus den Teilvorhaben 1 bis 6. Der hohe Aschegehalt (Filterasche) der Pellets resultiert aus Zuschlagstoffen, die der Prozessführung in der zirkulierenden Wirbelschicht zugeführt wurden. Der tatsächliche Ascheanteil der Pellets liegt im Bereich von ca. 3 bis 6%.

Tab. III.3.2.1-1: Rohstoffparameter

Parameter		Fruchtart		
		Roggen	Mais	Gras
Ertrag Erntegut	tTM/ha	11	9	9
Silierverlust	%	8	8	8
TM-Gehalt Silage	%	35	34	35
TM-Gehalt Pressgut	%	40	45	45
TM-Gehalt Presssaft	%	11,9	13,5	9,0
TM-Gehalt Pellets	%	90	90	90
Anfall Filterasche	%	25	20	17

III.3.2.2 Anlagengrößen und Massenfluss

Nach Absprache mit den Anlagenherstellern Anhydro und Amandus Kahl haben sich die Projektpartner auf drei Anlagenkapazitäten mit einer Produktionskapazität von 12.500, 25.000 und 50.000 t Pellets im Jahr geeinigt. Als Entscheidungshilfe dienten die Abschätzungen zum Flächenverbrauch der Modellregion in Niedersachsen. Aus der Vorgabe, dass von der zur Verfügung stehenden Fläche 20 % zum Anbau von Gras und 80 % zum Anbau von Roggen und Mais nutzbar sind, errechnete sich ein Substratmix von 49 % Roggen-, 41 % Mais-, und 10 % Grassilage.

Ausgehend von der Ermittlung der Presssaftmenge nach:

$$m^3_{PS} / t_{SL} = \frac{TM_{PG}\,\% - TM_{SL}\,\%}{TM_{PG}\,\% - TM_{PS}\,\%}$$

[6] $PA_{12.500}$: Produktionsanlage mit einer Kapazität von jährlich 12.500 t Pellets

wurden die weiteren Massenströme (**Tab. III.3.2.2-1**) berechnet. Falls keine anderen Einheiten angegeben sind, gilt der Frischmassebezug. Der benötigte Flächenbedarf reicht von ca. 750 ha bei $PA_{12.500}$ bis 3.032 ha bei $PA_{50.000}$.

Tab. III.3.2.2-1: Massenfluss in Abhängigkeit der Produktionskapazität

Parameter		Anlagengröße / Produktionskapazität in t_{PL}/Jahr		
		12.500	25.000	50.000
Rohstoff				
Flächenbedarf	ha	758	1.516	3.032
Erntemenge	t/a	39.014	78.027	156.054
Silage	t/a	35.892	26.988	53.977
Pressgut	t/a	26.602	53.203	106.407
Presssaft	m³/a	9.290	18.581	37.163
Trockengut	t/a	12.640	25.281	50.562
Wasser (verdampft)	t/a	13.961	27.923	55.845
Asche*	t/a	2.771	5.542	11.084
Gärrest	m³/a	7.926	15.851	31.703

* Filterasche

III.3.2.3 Ökonomische Bewertung

Rohstoffbereitstellung

In der Planungsvariante wurde für den Substratmix von 49 % Roggen-, 41 % Mais- und 10 % Grassilage ein Mischpreis 95 €/t_{TM} frei Anlage (ohne Transportkosten) unterstellt. Im Ergebnis der Sensitivitätsanalyse zeigte sich, dass Schwankungen im Substratpreis die Pelletkosten am stärksten beeinflussen. Einzelheiten zur Verarbeitungseignung der einzelnen Silagearten sind dem BioLog-Abschlussbericht des ATB (Idler, Fürl, Schemel, 2008) zu entnehmen. In Abhängigkeit der Anlagengröße wurden folgende durchschnittliche Transportentfernungen abgeschätzt: $PA_{12.500}$= 5,5 km, $PA_{25.000}$ = 7,5 km und $PA_{50.000}$ = 10,5 km. Auf Grund der unterschiedlichen Transportentfernungen ergaben sich gegenüber der $PA_{12.500}$ Mehrkosten von ca. 3 €/t_{PL} für $PA_{25.000}$ und 7 und €/t_{PL} $PA_{50.000}$.

Produktion von Energiepflanzenpellets und Vergärung der Presssäfte

Mit zunehmender Anlagengröße sanken trotz steigender Investitionssummen die kapitalgebundenen Kosten um 25 % von 40 €/t_{PL} ($PA_{12.500}$) auf 30 €/t_{PL} ($PA_{25.000}$). Der Degressionseffekt von $PA_{25.000}$ auf $PA_{50.000}$ fiel mit 7 % Kostenreduktion deutlich geringer aus. Die betriebsgebundenen Kosten für Bedienung und Anlagenerhaltung reduzierten sich um jeweils 27 % von einer Produktionskapazität zur nächst Größeren. Während die kapital- und betriebsgebundenen Kosten je nach Anlagengröße und Art der Stromverwertung zwischen 12 % und 15 % bzw. zwischen 11 % und 19 % der Pelletkosten ab Anlage betrugen, entfiel neben den Rohstoffkosten (41 % bis 52 %) ein großer Teil auf die verbrauchsgebundenen Kosten. Diese bestanden im Wesentlichen aus den Trocknungskosten (Wärme) und zu einem geringen Teil aus Kosten für elektrische Energie (**Abb. III.3.2.3-1, A1, B1, C1**). Letzterer war so gering,

weil ein großer Anteil aus der Stromproduktion der Biogasanlage (Eigennutzung) abgedeckt werden konnte. Neben der Eigennutzungsvariante wurde auch das ökonomische Ergebnis bei Stromeinspeisung nach EEG berechnet. Entsprechend dem Presssaftanfall der drei Produktionskapazitäten (12.500, 25.000 und 50.000) resultierten drei Biogasanlagengrößen. Basierend auf der jeweiligen EEG-Vergütungsmöglichkeit für entsprechende Anlagengrößen und Substrate ergaben sich bei Netzeinspeisung bezüglich des Einspeiseentgeltes wesentliche Unterschiede zwischen den Anlagen (**Abb. III.3.1.3-1**).

Tab. III.3.2.3-1: Parameter der Biogaserzeugung

Parameter		Anlagengröße / Produktionskapazität in t_{PL}/Jahr		
		12.500	25.000	50.000
Biogasanlage				
Anlagengröße	kW	220	450	930
Wirkungsgrad BHKW el	%	38	39	40
EEG-Vergütung mit KWK	C/kWh	21,30	20,43	17,74

Die Vergütungssätze resultierten aus der Grundvergütung, welche mit dem Ziel der Kleinanlagenförderung mit zunehmender Anlagengröße sinkt. Für Anlagen bis 150 kW beträgt die Grundvergütung 11,67 Cent/kWh, bis 500 kW 9,18 Cent/kWh und bis 5.000 kW 8,05 Cent/kWh. Weiterhin wurde unterstellt, dass der Nawarobonus für die Presssaftvergärung von 7 Cent/kWh für Anlagen bis 500 kW und von 4 Cent für Anlagen bis 5.000 kW in Anspruch genommen werden konnte. Die Berechnung erfolgte für alle drei Anlagengrößen sowohl mit als auch ohne KWK-Bonus (3 Cent/kWh). Der Modellansatz sah vor, die BHKW-Wärme in jedem Fall der Pelletproduktion zu zuführen. Insgesamt war durch das BHKW nur eine ca. 10 %ige Wärmeabdeckung zu erzielen. Mit steigender Anlagengröße ermöglichten höhere BHKW-Wirkungsgrade (el.) eine zunehmende Abdeckung des Strombedarfes der Pelletproduktion. So umfasste der Anteil an Zukaufstrom aus dem Netz ca. 25 % bei $PA_{12.500}$, ca. 15% bei $PA_{25.000}$ und ca. 8% bei $PA_{50.000}$ (**Tab. III.3.2.3-2**).

Tab. III.3.2.3-2: Energiebilanz der Gesamtanlage

Parameter		Anlagengröße / Produktionskapazität in t_{PL}/Jahr		
		12.500	25.000	50.000
Energie - Bedarf				
Strom	kWh/a	2.396.179	4.391.755	8.263.510
Wärme	kWh/a	17.598.974	35.197.948	70.395.895
Energie - Zufuhr aus Biogasanlage				
Strom	kWh/a	1.790.842	3.681.956	7.564.454
Wärme	kWh/a	1.604.338	3.208.676	6.417.353
Energie - Abdeckung aus Biogasanlage				
Strom	%	75	84	92
Wärme	%	10	10	10

Bei Stromnutzung im eigenen Betrieb entfiel auf die verbrauchsgebundenen Kosten, bei kostenneutraler Bewertung des selbst erzeugten Stroms und der selbst erzeugten Wärme, ein Anteil von 25 bis 27 % der Gesamtkosten. Wurde angenommen, dass anstelle des eigenen Stromes für die Pelletproduktion der Zukauf aus dem Netz für 0,12 €/kWh stattfand und gleichzeitig BHKW-Strom zu den in (**Tab. III.3.2.3-1**) dargestellten Vergütungssätzen (ohne KWK-Bonus) in das Netz eingespeist werden konnte, dann sanken die verbrauchsgebundenen Kosten um 2 bis 3 % gegenüber der Strom-Eigennutzungsvariante. Bei zusätzlicher Vergütung durch den KWK-Bonus betrug die Kostenreduktion 3 bis 4 %. In den Varianten A2, A3, B2, B3, C2 und C3 überstieg der Stromerlös bei Einspeisung die Stromkosten bei Eigennutzung (A1, A2, A3). Aus Darstellungsgründen wird der zusätzliche Einkommenseffekt, der bei Netzeinspeisung entsteht, auf die gesamten Kosten umgelegt (**Abb. III.3.2.3-1**, einfarbige Säule).

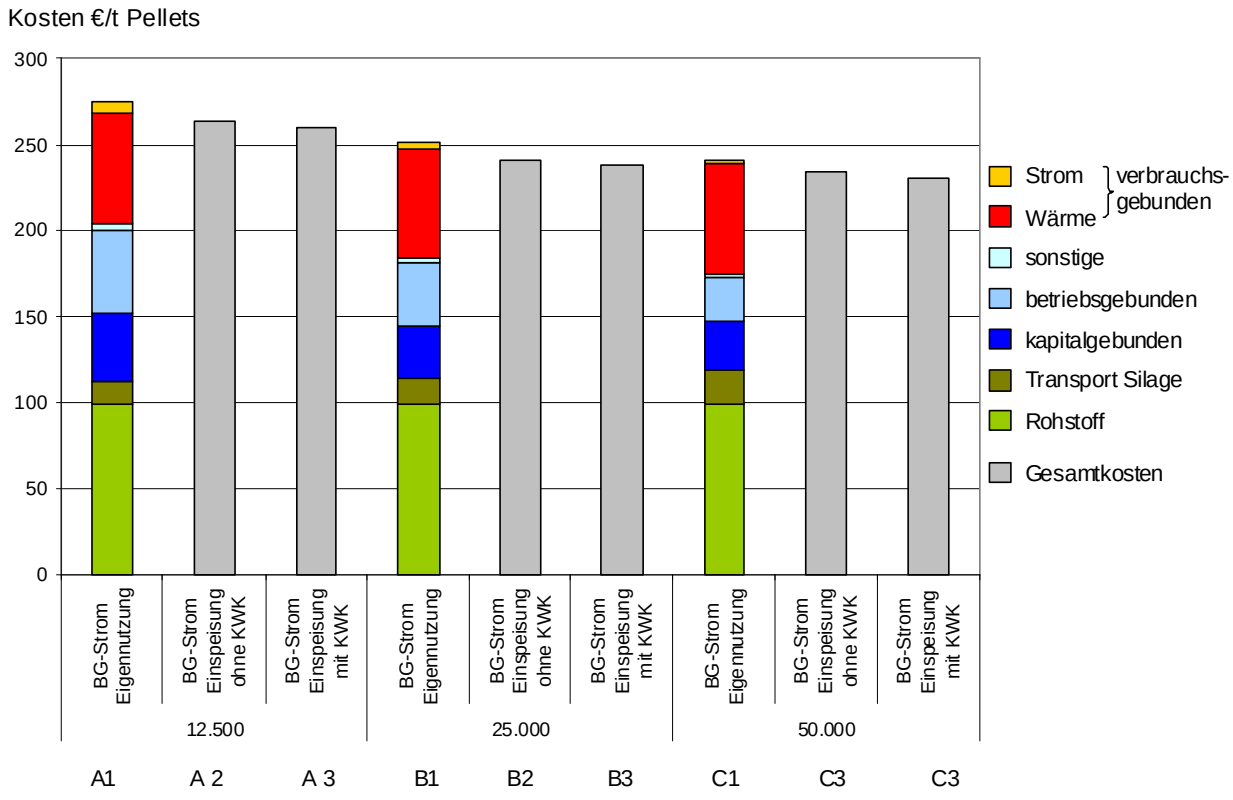


Abb. III.3.2.3-1: Kosten von Energiepflanzenpellets - Variantenübersicht

Im Ergebnis der Sensitivitätsanalyse haben Schwankungen im Substrat- und Wärmepreis den stärksten Einfluss auf die Pelletkosten gezeigt. Welche Höhe die Kosten der Pelletproduktion in Abhängigkeit dieser beiden Parameter annehmen kann, ist sowohl für den „ungünstigsten“ Fall (A1, **Tab. III.3.2.3-3**), als auch für den „günstigsten Fall“ (C3, **Tab. III.3.2.3-4**) dargestellt. Im ersten Betrachtungsfall betrug die Spannbreite der Pelletkosten 223 bis 381 €/t_{PL}. Unter diesen Bedingungen ist eine Vermarktung gegenüber Konkurrenzprodukten kaum möglich. Lediglich in Fall 2 waren bei äußerst niedrigen Biomasse- und Wärmepreisen Produktionskosten der Pellets von unter 200 €/t_{PL} (grün dargestellt) realisierbar.

Tab. III.3.2.3-3: Kosten von Energiepflanzenpellets (Bsp.: A1) in Abhängigkeit vom Rohstoff- und Wärmepreis; Bsp.: 12.500-Anlage mit Eigenstromnutzung (gelb > 200 – 300 €/t_{PL}, rot > 300 €/t_{PL})

Substratpreis €/t_{TM*}	Wärmepreis in €/ kWh										
	3,00	3,50	4,50	**5,00**	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00	8,50
65	223	230	236	243	249	255	262	268	275	281	287
75	234	240	247	253	259	266	272	279	285	291	298
85	244	251	257	263	270	276	283	289	295	297	308
95	255	261	267	**274**	280	287	293	299	306	302	319
105	265	271	278	284	291	297	303	310	316	312	329
115	275	282	288	294	301	307	314	320	326	323	339
125	286	292	298	274	311	318	324	330	337	333	350
135	296	302	309	305	322	328	334	341	347	343	360
145	306	313	319	315	332	338	345	351	358	354	370
155	317	323	330	326	342	349	355	362	368	364	381

Tab. III.3.2.3-4: Kosten von Energiepflanzenpellets (Bsp.: C 3) ab Anlage in Abhängigkeit vom Rohstoff- und Wärmepreis; Bsp.: 50.000-Anlage mit Stromeinspeisung und KWK-Bonus (grün: ≤ 200 €/t_{PL}, gelb > 200 – 300 €/t_{PL}, rot > 300 €/t_{PL})

Substratpreis €/t_{TM*}	Wärmepreis in €/ kWh										
	3,00	3,50	4,50	**5,00**	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00	8,50
65	180	187	193	199	206	215	219	225	231	238	244
75	191	197	203	210	216	223	229	235	242	248	255
85	201	207	214	220	227	233	239	246	252	253	265
95	211	218	224	**230**	237	243	250	256	262	258	275
105	222	228	234	241	247	254	260	266	273	269	286
115	232	238	245	251	258	264	270	277	283	279	296
125	242	249	255	230	268	274	281	287	294	290	306
135	253	259	266	262	278	285	291	297	304	300	317
145	263	269	276	272	289	295	301	308	314	310	327
155	273	280	286	282	299	305	312	318	325	321	337

Verwertung der Nebenprodukte

Gärreste und Presssäfte

Beim Ausbringen der Gärreste auf die landwirtschaftliche Nutzfläche ist zur Verminderung von Nährstoffverlusten (NH_4) ein zügiges bodennahes Ausbringen (Schleppschlauch) oder Einarbeiten (Güllegrubber) anzustreben. Entsprechend der unter Kapitel **III.3.1.3** angegebenen Nährstoffpreise und der N-, P-, K-, Mg- und Ca-Gehalte errechnete sich über den Nährstoffwert zunächst eine Gutschrift von ca. 4,5 €/t_{PL}. Abzüglich der Ausbringungskosten von 3 €/t_{PL} für 5,5 km, 3,2 €/t_{PL} für 7,5 km und 3,5 €/$_{tPL}$ für 10,5 km und einer Menge von 12 m³/ha ist nicht von einer Aufwertung des ökonomischen Ergebnisses auszugehen. Gleiches gilt tendenziell für die Presssäfte.

Aschen

Hohe P-, K- und Ca-Anteile in der Asche bedingen einen Nährstoffwert von ca. 10 €/t. Wie bereits im Düngungsteil dargestellt, liegen keine Aussagen zu den technologischen Düngungseigenschaften, insbesondere zum Staub- und Streuverhalten vor. Um dennoch Kostentendenzen aufzuzeigen, werden Ausbringungskosten unterstellt, die bei der üblichen Kalkung in der Landwirtschaft anfallen. Diese betragen beispielsweise bei Ausbringung mit schlagkräftiger Technik ab Feldrand und einer Ausbringungsmenge von 5 t/ha ca. 1,20 €/t_{PL}. Hinzu kommt der Aschetransport mit LKW der u. U. auch überregional stattfindet. Hier können je nach Entfernung, Streckenlage und LKW-Auslastung Kosten von 4 bis 8 €/t_{PL} anfallen. Eine mögliche Rückführung der Dünger beeinflusst das Ergebnis, die Pelletkosten, nur unwesentlich. Kann die Asche nicht als Düngemittel genutzt werden, fallen zusätzlich Entsorgungskosten an. Für Bioenergieanlagen nach (Raab, Jahrhaus, Heinrich, 2008) betragen die Aufwendungen zur Ascheentsorgung 0,1 bis 0,5 % der Investkosten einer Bioenergieanlage (Verbrennungsanlage).

III.3.3 Ausblick

Eine wettbewerbsfähige Produktion von Energiepflanzenpellets ist nach dem dargestellten Verfahren kaum realisierbar. Hinzu kommen Kosten, die durch den Transport der Pellets zur Konversionsanlage entstehen. Eine Möglichkeit zur Kostensenkung besteht nach Aussage der im Projekt beteiligten Firmen darin, mit Hilfe innovativer Techniken optimierte Trocknungsverfahren zu entwickeln. Laut Berichtslegung der Partner wird das Einsparpotenzial bei thermischer Energie auf 50 bis 60 % beziffert. Unter Berücksichtigung höherer Investitionskosten wäre dann ein Pelletpreis z. B. unter den Annahmen der 25.000er-Anlage von 210 bis 230 €/t_{PL} denkbar.

III.3.4 Zusammenfassung ökonomische Gesamtbetrachtung

In den betrachteten Anlagengrößen wurden unter den genannten Festlegungen Energiepflanzenpellets zu Kosten von 231 bis 274 €/t_{PL} produziert. Mit steigender Anlagenkapazität sanken die Produktionskosten auf Grund von Degressionen im Bereich der kapital- und betriebsgebundenen Kosten. Durch Stromeinspeisung nach den Vergütungssätzen des EEG 2009 konnten weitere, wenn auch schwächere Kostensenkungen realisiert werden. Sollte eine Nutzung der Nebenprodukte als landwirtschaftliches Düngemittel möglich sein, wird das betriebswirtschaftliche Ergebnis kaum beeinflusst, da der Nährstoffwert durch die Transport- und Ausbringungskosten im Wesentlichen kompensiert wird. Unter derzeitigen Rahmenbedingungen ist eine Konkurrenzfähigkeit der Energiepflanzenpellets aus Silagen kaum möglich. Bei einer zukünftigen Nachfrageentwicklung nach Energiepflanzenpellets sind Großanlagen zu den genannten Rahmenbedingungen wirtschaftlicher zu betreiben. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass diese einen erheblichen Flächenanspruch besitzen und somit u. U. die Konkurrenz um Flächen die Biomassepreise antreibt.

III.4 Literaturverzeichnis

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (2008): Was kosten Substrate frei Fermenter? LfL-Information September 2008.

Beck, J., Vetter, A. (2008): Überlegungen zur standortangepassten Größe eines Trockenwerkes zur Produktion von Energiepflanzenpellets. Projektinternes Paper, unveröffentlicht.

Bioabfallverordnung (BioAbfV) (1998): Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung - BioAbfV). BGBL. I 1998, 2955

Düngemittelgesetz (DüngMG) (1977): Düngemittelgesetz - DüngMG. BGBL. I 1977, 2134

Düngemittelverordnung (DüMV) (2008): Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV) vom 12. Dezember 2008. BGBL. I 2008, 2524

Düngeverordnung (DüV) (2007): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenschutzmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis (Düngeverordnung - DüV) vom 27. Februar 2007. BGBL. I 2007, 22

FNR (2008): Standortangepasste Anbausysteme für Energiepflanzen. Broschüre der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow. 80 S.

Fischer, J., Jahrhaus, B., Heinrich, P. (2008): Umsetzung eines Projektes. In FNR: Leitfaden Bioenergie. Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. S. 290 – 329.

Fritsche u. a. (2004): Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse, Endbericht im Auftrag des BMU.

Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG) (2008): Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare – Energien – Gesetz – EEG). BGBL. I 2008, 2074

Gödeke, K.; Vetter, A. (2005): Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von

Energiepflanzen unter verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands. AINFO-Beitrag. www.tll.de/ainfo

Graß, R., Scheffer, K. (2005): Alternative Anbaumethoden: Das Zweikulturnutzungssystem. In: Natur und Landschaft, 80. Jahrgang, Heft 9/10, S.435-439.

Idler, C., Fürl, C., Schemel, H. (2008): Bereitstellung qualitätsgerechter Silage sowie Ermittlung der energetischen und ökonomischen Kenngrößen zur Bewertung und Optimierung des Gesamtverfahrens. Abschlussbericht zum Teilprojekt *Silierung* des Teilvorhabens 2. BioLog-Verbundprojekt.

Klärschlammverordnung (AbfKlärV) (1992): Klärschlammverordnung – AbfKlärV. BGBL. I 1992, 912

Knoblauch, S. (1990): Untersuchungen zur Verwertung von Silosickersaft im Pflanzenbau. Dissertation, S. 27 ff., Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.

KTBL (2008): Betriebsplanung Landwirtschaft 2008/09. KTBL-Datensammlung. 21 Auflage 2008. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL). Darmstadt.

Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (2008): Inhaltsstoffe von Gärprodukten und Möglichkeiten zu ihrer geordneten pflanzenbaulichen Verwertung.

Lütke-Entrup, N., Oehmichen, J. (2000): Lehrbuch des Pflanzenbaues. Band 2: Kulturpflanzen. Verlag Thomas Mann.

Raab, K., Jahrhaus, B., Heinrich, P. (2008): Rechtliche Rahmenbedingungen. In FNR: Leitfaden Bioenergie. Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. S. 195 – 245.

Reinhold, G. (2007). Biogas – Stand und Perspektiven unter den Bedingungen steigender Agrarpreise. Vortrag AG Biogas des TBV am 18.10.2007 in Kölleda.

Rinder, R. (2008): mündliche Mitteilung

Scholz, V. u. a. (2008): Entwicklung und Erprobung einer neuen Verfahrenslinie zur Herstellung von Energiepellets aus Ganzpflanzensilage sowie Ermittlung der Leistungsparameter und des Energieaufwandes. Abschluss-

Teilbericht 2.2 des FNR Verbundprojektes BioLog *Neue Logistikkonzepte für Biobrennstoffe*.

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (2009 a): EEG Stromvergütungsrechner 2009. http://www.tll.de/ainfo/sbndx25.htm?key=Biogas.

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (2009 b): Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Körnermais.

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (2007a): Düngung in Thüringen 2007 nach „Guter fachlicher Praxis“. Schriftenreihe Heft 7/2007.

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (2007b): Betriebswirtschaftliche Richtwerte für die Produktion von Silomais.

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (2005): Rechtliche Aspekte des Einsatzes von Gärrückständen aus der Biogaserzeugung in der Landwirtschaft. Merkblatt

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (2004): Betriebswirtschaftliche Richtwerte für die Feldgrasproduktion.

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (1998): Anwendung von Silosickersaft in der Pflanzenproduktion. Merkblatt

Scheffer, K. (1997): Fasern, Formteile, Öl und Energie aus feuchtkonservierter Biomasse. In: Stoffliche Nutzung Nachwachsender Rohstoffe. Tagungsband: Internationale Tagung Stoffliche Nutzung Nachwachsender Rohstoffe 1997, Dresden.

Schilling, G. (2000): Pflanzenernährung und Düngung. Eugen Ulmer Stuttgart. 464 S.

Scholz, V. u. a. (2008): Entwicklung und Erprobung einer neuen Verfahrenslinie zur Herstellung von Energiepellets aus Ganzpflanzensilage sowie Ermittlung der Leistungsparameter und des Energieaufwandes. Abschluss-Teilbericht 2.2 des FNR Verbundprojektes BioLog *Neue Logistikkonzepte für Biobrennstoffe.*

Stülpnagel, R. (1998): Förderung der Artenvielfalt und Verbesserung der Brennstoffqualität durch die thermische Nutzung von feucht-konservierten Aufwüchsen aus Naturschutz- und Grünlandflächen. In: Biomasse: umweltschonender Energie- und Wertstofflieferant der

Zukunft. Tagungsband: Ökologischer Fachkongress Biomasse 1998, Stuttgart.

VDI (1996): VDI 6025: Betriebswirtschaftliche Berechnungsverfahren für Investitionsgüter und Anlagen, Wirtschaftlichkeitsberechnungsverfahren, November 1996. Beuth Verlag GmbH, Berlin. 1996.

Vetter, A. (2006): Entwicklung standortangepasster Anbausysteme für Energiepflanzen. In: Schriftenreihe Heft 12 „12. Thüringer Bioenergietag“ (2006), S. 13 – 23

Vodegel, S., Immisch, C., Schindler, M. (2008): Vergasung von Biomassen in einer zirkulierenden Wirbelschicht. Tagungsbericht 2008/2. Beiträge zur DGMK-Fachbereichstagung „Energetische Nutzung von Biomassen“, 14-16. April 2008 in Velen/Westf.. Hrsg.: Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V..

III.5 Abkürzungsverzeichnis

aac	alkalisch-ammoncitrat-löslich
AF	Ackerfläche
AS	Asche
BG	Biogas
BGA	Biogasanlage
BHKW	Blockheizkraftwerk
BSB_5	Biochemischer Sauerstoffverbrauch in 5 Tagen
CSB	Chemischer Sauerstoffverbrauch
DM	Düngemittel
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
el. LF	elektrische Leitfähigkeit
EVA	Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands
GPS	Ganzpflanzensilage
GF	Grünlandfläche
GR	Gras
GS	Gärrest
KB (8,2)	Basenkapazität
KS (4,3)	Säurekapazität
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LF	Landwirtschaftliche Nutzfläche
MD	Mineraldünger
ME	Maßeinheit
OD	organischer Dünger
OS	Originalsubstanz
OTM	organische Trockensubstanz

PA	Produktionsanlage zur Herstellung von Energiepflanzenpellets
pH	pH-Wert
PL	Pellets
PS	Presssaft
TM	Trockenmasse
TNb	Untersuchungsmethode zur Bestimmung von Gesamtstickstoff Chemoluminiszenzdedektion nach Pyrolyse
RG	Roggen
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
SL	Silage
SM	Silomais
SSS	Silosickersaft
UK	Unbehandelte Kontrolle
V	Versuch
ZKNS	Zweikulturnutzungssystem

chemische Elemente

As	Arsen
Ca	Calzium
Cd	Cadmium
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
K	Kalium
Mg	Magnesium
NH_4-N	Ammonium-N
Ni	Nickel
NO_3-N	Nitrat-N
Nt	Gesamtstickstoff
Hg	Quecksilber

Pb	Blei
P	Phosphor
Tl	Thallium

III.6 Abbildungsverzeichnis

Abb. III.1-2	Gesamtdarstellung des Verfahrens	S. 75
Abb. III.2.1.4-1	Gefäßversuchsstation der TLL mit „BioLog-Versuchen“	S. 82
Abb. III.2.2.1-1	Entwicklung der Versuchspflanzen 48 Tage nach Gefäßansatz	S. 88
Abb. III.2.2.1-2	Fruchtfolgeertrag relativ in % der UK, Bezugsbasis TM, V1-PS-N	S. 89
Abb. III.2.2.1-3	Fruchtfolgeertrag relativ in % der UK, Bezugsbasis TM, V1-PS-P	S. 90
Abb. III.2.2.2-1	Fruchtfolgeertrag relativ in % der UK, Bezugsbasis TM, V2-PS-N	S. 91
Abb. III.2.2.2-2	Fruchtfolgeertrag relativ in % der UK, Bezugsbasis TM, V2-PS-P	S. 92
Abb. III.2.2.3-1	Fruchtfolgeertrag relativ in % der UK, Bezugsbasis TM, V4-PS-N	S. 95
Abb. III.2.2.4-1	Fruchtfolgeertrag relativ in % der UK, Bezugsbasis TM, V5-GS-N	S. 97
Abb. III.2.2.4-2	Fruchtfolgeertrag relativ in % der UK, Bezugsbasis TM, V5-GS-P	S. 98
Abb. III.2.2.5-1	Fruchtfolgeertrag relativ in % der UK, Bezugsbasis TM, V3-AS-P	S. 99
Abb. III.2.2.5-2	Fruchtfolgeertrag relativ in % der UK, Bezugsbasis TM, V3-AS-K	S. 100
Abb. III.2.2.6-1	Fruchtfolgeertrag relativ in % der UK, Bezugsbasis TM, V6-AS-P	S. 101
Abb. III.2.2.6-2	Fruchtfolgeertrag relativ in % der UK, Bezugsbasis TM, V6-AS-K	S. 102
Abb. III.3.1.3-1	Nutzungsmöglichkeiten von „BHKW Strom“	S. 108
Abb. III.3.2.3-1	Kosten von Energiepflanzenpellets - Variantenübersicht	S. 114

III.7 Tabellenverzeichnis

Tab. III.2.1.1-1	Staffelung der Nährstoffgaben	S. 77
Tab. III.2.1.2-1	Eigenschaften untersuchter Presssäfte	S. 78
Tab. III.2.1.2-2	Eigenschaften untersuchter Aschen	S. 79
Tab. III.2.1.2-3	Eigenschaften untersuchter Gärrückstände	S. 80
Tab. III.2.1.3-1	Eigenschaften der verwendeten Böden	S. 81
Tab. III.2.1.5-1	Übersicht Gefäßversuche	S. 83
Tab. III.2.1.5-2	Nährstoff- und Presssaftmenge V1/V2 (Prüffaktor N und P, Wdh.=4)	S. 84

Tab. III.2.1.5-3	Nährstoff- und Aschemenge V3 (Prüffaktor P und K, Wdh.=4)	S. 85
Tab. III.2.1.5-4	Nährstoff- und Presssaftmenge V4 (Prüffaktor N, Wdh.=3)	S. 86
Tab. III.2.1.5-5	Nährstoff- und Gärrestmenge V5 (Prüffaktor N und P, Wdh.=4)	S. 86
Tab. III.2.1.5-6	Nährstoff- und Aschemenge V4 (Prüffaktor P und K, Wdh.=4)	S. 87
Tab. III.2.2.1-1	MDÄ,V1-PS-N	S. 90
Tab. III.2.2.1-2	MDÄ,V1-PS-P	S. 91
Tab. III.2.2.2-1	MDÄ,V2-PS-N	S. 92
Tab. III.2.2.2-2	MDÄ,V2-PS-P	S. 93
Tab. III.2.2.2-3	Merkmale von Silosickersaft	S. 94
Tab. III.2.2.3-1	MDÄ,V4-PS-N	S. 96
Tab. III.2.2.4-1	MDÄ,V5-GS-N	S. 98
Tab. III.2.2.5-1	MDÄ,V3-AS-P	S. 99
Tab. III.2.2.5-2	MDÄ,V3-AS-K	S. 100
Tab. III.2.2.6-1	MDÄ,V6-AS-P	S. 101
Tab. III.2.2.6-2	MDÄ,V6-AS-K	S. 102
Tab. III.2.3-1	Schadstoffe von “BioLog-Aschen” und Grenzwerte/ Kennzeichnung nach DüMV	S. 104
Tab. III.2.4-1	Nährstoffgehalte der untersuchten Nebenprodukte	S. 105
Tab. III.3.2.1-1	Rohstoffparameter	S. 110
Tab. III.3.2.2-1	Massenfluss in Abhängigkeit der Produktionskapazität	S. 111
Tab. III.3.2.3-1	Parameter der Biogaserzeugung	S. 112
Tab. III.3.2.3-2	Energiebilanz der Gesamtanlage	S. 113
Tab. III.3.2.3-3	Kosten von Energiepflanzenpellets (Bsp.: A1) in Abhängigkeit von Rohstoff- und Wärmepreis; Bsp.: 12.500-Anlage mit Eigenstromnutzung (gelb >200 – 300 €/t_{PL}, rot >300 €/t_{PL})	S. 115
Tab. III.3.2.3-4	Kosten von Energiepflanzenpellets (Bsp.: C3) ab Anlage in Abhängigkeit von Rohstoff- und Wärmepreis; Bsp.: 50.000-Anlage mit Stromeinspeisung und KWK-Bonus (grün: ≤ 200 €/t_{PL}, gelb > 200 – 300 €/t_{PL}, rot >300 €/t_{PL})	S. 115

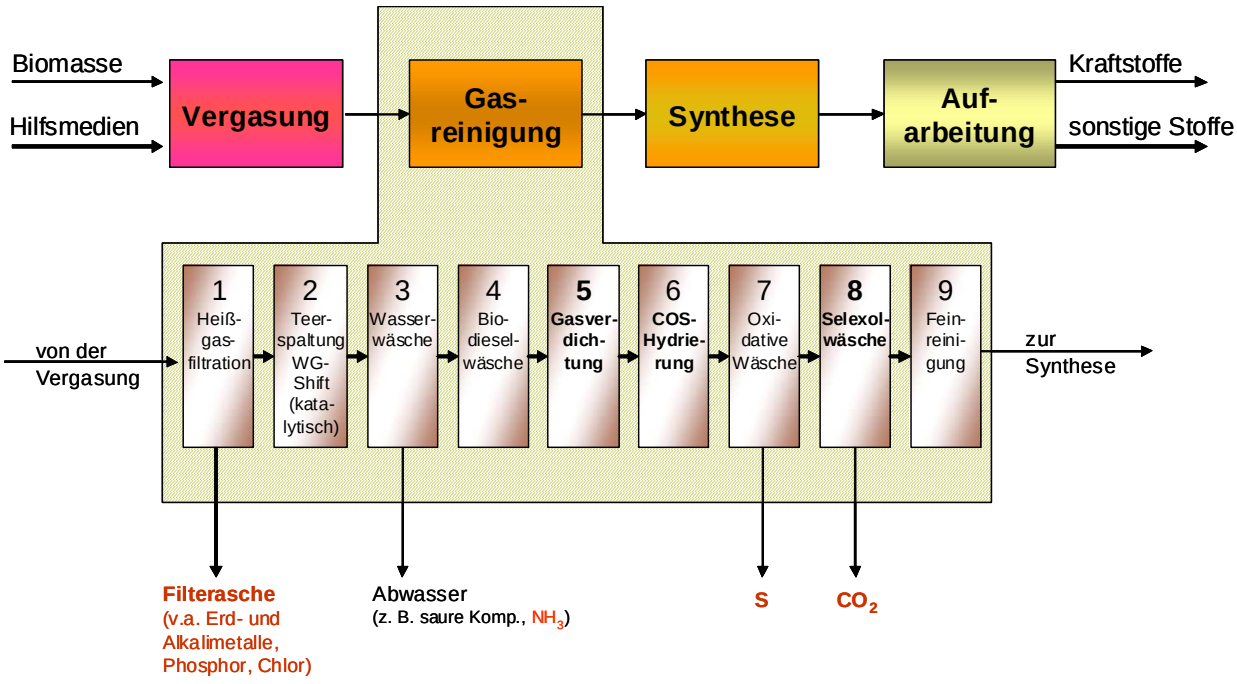
IV. Ökonomie der thermischen Verwertung

IV.1 Aufgabenstellung

Die aus Silagen verschiedener Halmgüter hergestellten Pellets können durch Vergasung in ein Synthesegas überführt werden (s. Kap. II.5). Diese aus der chemischen Industrie bekannten Gasgemische, charakterisiert durch die Gasbestandteile Kohlenmonoxid und Wasserstoff, dienen traditionsgemäß als Grundlage für viele Grundchemikalien der stofflichen Verwertung. Für energetische Zwecke ist die Überführung in einen Energieträger wie BtL, SNG oder LPG denkbar. Entwicklungsprojekte zum BtL- und SNG-Einsatz werden seit wenigen Jahren in der EU intensiv unterstützt. Gemeinsam ist allen Konzepten, dass in den Synthesen empfindliche Katalysatoren verwendet werden müssen, welche sehr aufwändige Gasreinigungen erfordern. Da auch die Baugruppen Vergasung und Synthese technisch komplex sind, ist der Gesamtinvest grundsätzlich hoch. Aufgrund des bekannten degressiven Verlaufes der Investkosten mit der Anlagengröße (zumindest wenn die Apparate vergrößerbar sind und die steigende Kapazität nicht durch Mehrlinigkeit erzielt werden muß) sinkt der auf die Tonne Produkt bezogene spezifische Kapitaldienst mit der Anlagenkapazität.

So geht man in den Polygeneration-Konzepten der TU Wien mit allothermer Wirbelschicht von einer Mindestgröße von 100 MW_{therm} aus [1]. Alle anderen Marktbegleiter rechnen in ihren Verfahren mit höheren Einheiten. Das BioLiq-Verfahren des KIT Karlsruhe setzt in seinen Planungen, zumindest für den zentralen Vergaser, eine Größe von über 1 GW_{therm} an [2]. Das Choren-Verfahren® bevorzugt 400 MW_{therm} und mehr [3], das ArtFuel-Verfahren mit autothermer Wirbelschicht dürfte sich erst ab mindestens 200 MW_{therm} wirtschaftlich realisieren lassen.

In Rahmen von BioLog erfolgt die Wirtschaftlichkeitsberechnung einer BtL-Anlage exemplarisch nach dem Clausthaler Konzept (s. **Abb. IV.1-1**). Als Modellgröße wird 500 MW_{therm} angesetzt.



Bem.: WG: Wassergas, NH_3: Ammoniak, S: Schwefel, CO_2: Kohlendioxid

Abb. IV.1-1: Grundfließbild ArtFuel-Konzept

Zu bemerken ist, dass die Darstellung noch eine Unvollkommenheit aufweist: Aus der FTS-Synthese und einer folgenden Aufarbeitung in Form einer Destillation entspringt der sog. „Straight-Run-Diesel“. Er besitzt eine zu hohe Oktanzahl und zu hohen Cloudpunkt [4] zur kommerziellen Anwendung. Daher ist eine thermische Aufarbeitung notwendig. Außerdem ist damit zu rechnen, dass die Mineralölkonzerne Additive zur Erzielung bestimmter Eigenschaften zusetzen werden. Da der Verfahrensweg der Aufarbeitung z.Z. nicht mit finanziellen Daten hinterlegt werden kann, gehen die Betrachtungen im Folgenden nur bis zum Straight-Run-Diesel.

Technisch denkbar ist auch eine Verbrennung der Pellets in dezentralen Feuerungsanlagen. Die zu erwartenden Schwierigkeiten durch den niedrigen Ascheschmelzpunkt sind in Kap. II.5.2 geschildert worden. Ebenso die Erscheinung, dass auftretende Emissionen eine Abgasreinigung erfordern. Trotzdem soll eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung gemäß der DIN 2067 durchgeführt werden. Die Kosten der Abgasreinigung wurden dabei mangels unbekannter existierender Anlagen abgeschätzt.

IV.2 Grundlagen der dynamischen Rechnung

Wegen des hohen Kapitaleinsatzes ist damit zu rechnen, dass die BtL-Anlagen eine Lebensdauer von mindestens 20 Jahren aufweisen sollten. Während einer so langen Zeit werden Reinvestitionen anfallen, der Reparatur- und Wartungsaufwand wird nach ein paar Jahren ansteigen und unterschiedliche Inflationstendenzen bei den Kosten und den Erlösen das Bild des Betriebsergebnisses ändern. Voraussagen über Tendenzen sind schwierig zu treffen. Über Annahmen und darauf aufbauenden Sensitivitätsanalysen aber können a) signifikante von unwesentlichen Ergebnisfaktoren getrennt werden und b) Größenordnungen für den Produktionspreis der Produkte getroffen werden.

Der hier vorliegenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtung liegt ferner der Gedanke zugrunde, dass Investoren eine Verzinsung ihres Kapitals erzielen möchten. Der jährliche Gewinn ist zu versteuern. Der Abgabepreis der Kohlenwasserstoffe umfaßt daher im Folgenden nicht nur die reinen Gestehungskosten, sondern beinhaltet eine Renditeerwartung. Als Maß für den Referenzzustand wurde ein Interner Zinsfuß von 10 %, bezogen auf das Gesamtkapital und nach einer Betriebszeit von 20 Jahren, festgelegt.

Die Wirtschaftlichkeitsrechnung umfasst mehrere Module (s. **Abb. IV.2-1**).

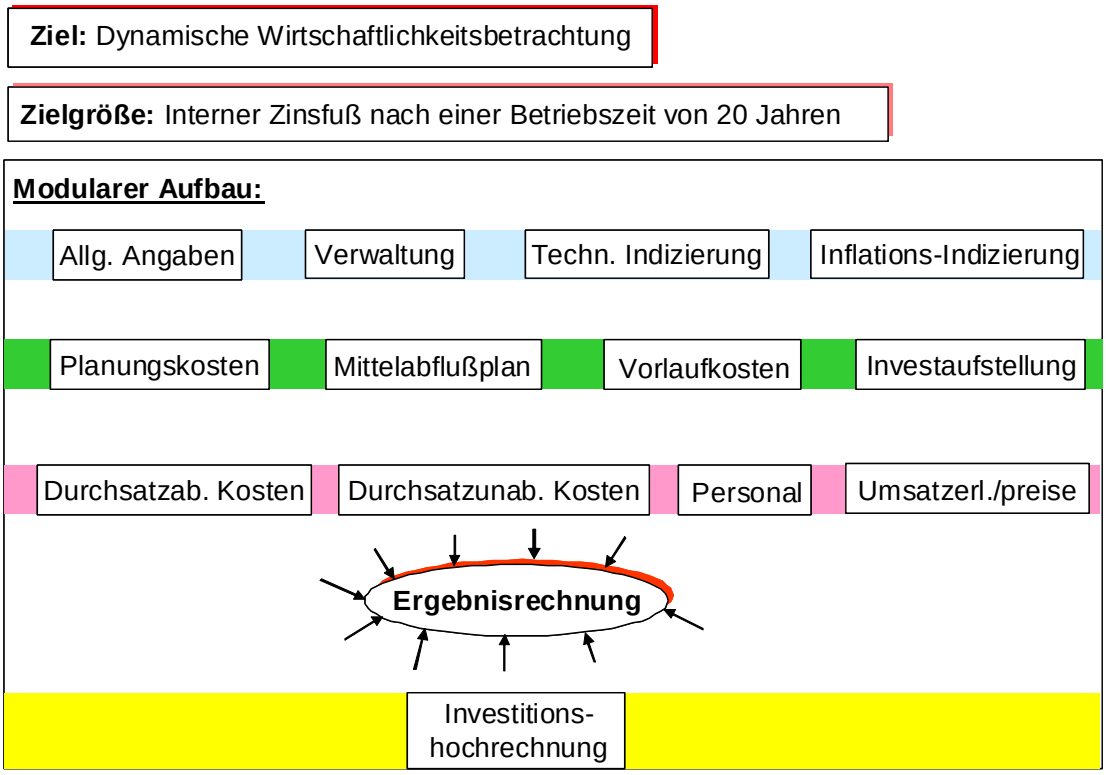


Abb. IV.2-1: Aufbau der dynamischen Wirtschaftlichkeitsberechnung

Für den großen Posten „Investaufstellung“ dient das in **Abb. IV.1-1** dargestellte Grundfließbild als Basis. Darauf aufbauend war es in einem abgeschlossenen Vorhaben möglich, durch Richtpreisanfragen bei Anlagenbauern sowie Literaturangaben Investkosten für die Hauptbaugruppen zu erfahren [5]. Eine Anpassung an das Niveau des Jahres 2009 erfolgte durch Berücksichtigung einer durchschnittlichen Inflationsrate von 5 %/a, wie sie in der Chemiebranche in den letzten Jahren zu verzeichnen war [6].

Auch die durchsatzabhängigen Kosten fußen auf dem Grundfließbild. Dabei wurde von einem Durchsatz von 889.277 t/a bei einem mittleren Heizwert der Pellets von 16,16 MJ/kg ausgegangen (s. Kap. II.2). Als mittlere Transportentfernung wurden 70 km angesetzt. Die Transportkosten basieren auf einer umfangreichen Kostenuntersuchung der Landwirtschaftskammer Niedersachsen [7] im Rahmen der Länderkooperation Hessen, Brandenburg, Niedersachsen mit der Volkswagen AG. Als Modellstoff diente hier Stroh. Betrachtet wurden unterschiedliche Transportsysteme und Entfernungen bis 30 km. Zu berücksichtigen ist, dass die Dichte von gepresstem Stroh bei max. 400 kg/m^3 liegt; bei Pellets dagegen bei max. 600 kg/m^3 [8]. Ein Transportzug kann somit nur max. ca 16 t Stroh aufnehmen [9], für die Pellets wurden 25 t/Zug angesetzt und der spezifische Transportpreis entsprechend verringert.

Eine Übersicht über grundlegende Daten zeigt **Tab. IV.2-1**.

Tab. IV.2-1: Basisdaten der dynamischen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Input = Silagemischung mit H_u = 16,2 MJ/kg	Transport und Aufbereitung als durchsatzabhängige Kostengruppen auf Seiten der BtL-Anlage
Größe der Anlage = 500 MW_{therm} FWL Input = 889.277 t_{FS}/a Stunden auf Vollast = 8.000 h/a	*Preise:* Pellets = 55,- €/t_{FS}
Energieausbeute, gespeichert in den Kohlenwasserstoffen nach FTS = 38 %, bezogen auf Energieinhalt der Biomasse. Keine externe H_2-Zugabe.	*Erlöse:* Naphta = 34.232 t/a zu 500 €/t Straight Run Diesel = 48.347 t/a zu 1.690 €/t Wachs = 38.585 t/a zu 1.340 €/t Strom = 9,18 MW zu 13,1 cent/kWh
Betriebszeit = 20 Jahre, lineare Abschreibung, Interner Zinsfuß = 10 %	*Ansatz:* Stickstoff und Wärme keine verkaufsfähigen Produkte
Mittlere Transportentfernung = 70 km, eigener LKW mit 12,5 €/t_{FS} im Inbetriebnahmejahr der BtL-Anlage	

Technische Größen; Kaufmännische Grundlagen

Abkürzungen: FWL: **F**euerungs**w**ärme**l**eistung, FTS: **F**ischer **T**ropsch-**S**ynthese, FS: **F**eucht**s**ubstanz, BtL: **B**iomass-**t**o-**L**iquid.

Abgezielt wird in den Rechnungen auf einen Internen Zinsfuß von 10 % nach einer Betriebszeit von 20 Jahren (s.o.). Die Kosten für die Pellets und die Erlöse für die Kohlenwasserstoffe wurden entsprechend angepaßt. Der Preis für die Biomasse liegt weit unterhalb des in Kap. III.3 dargestellten Niveaus von 200 bis 300 €/t. Setzt man diese Größenordnung an, müßte der Erlös für die Kohlenwasserstoffe und den elektrischen Strom auf völlig unrealistische Größenordnungen angehoben werden bzw. sind Sensitivitätsanalysen unmöglich. Damit verzichtet man aber auf wesentliche betriebswirtschaftliche Erkenntnisgewinne.

IV.3 Ergebnisse für die BtL-Anlage

Eine Ergebnisdarstellung für die ersten sieben Betriebsjahre zeigt **Tab. IV.3-1**. Es ist zu sehen, dass sich mit den Preisen für Pellets und Kohlenwasserstoffe ein positiver Deckungsbeitrag erwirtschaften läßt.

Tab. IV.3-1: Ergebnisdarstellung für die ersten 7 Betriebsjahre der BtL-Modellanlage

Werte in €	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Brennstoffkosten	-65.539.732	-67.168.862	-68.841.161	-70.557.857	-72.320.216	-73.594.232	-75.322.141
Erlöse OUTPUT	177.300.786	181.254.163	185.302.901	189.449.560	193.696.777	196.878.573	201.052.266
sonst. Erlöse	0	0	0	0	0	0	0
SUMME ERLÖSE	111.761.054	114.085.300	116.461.740	118.891.704	121.376.562	123.284.340	125.730.124
Beseitigung Aschen	1.439.206	1.467.990	1.497.350	1.527.297	1.557.843	1.589.000	1.620.780
Beseitigung Adsorbens + Schwefel	529.120	539.702	550.496	561.506	572.736	584.191	595.875
WERTSCHÖPFUNG	109.792.728	112.077.608	114.413.893	116.802.900	119.245.982	121.111.149	123.513.469
Gehälter Angestellte	1.590.599	1.638.317	1.687.467	1.738.091	1.790.233	1.843.940	1.899.259
Löhne gewerb. Mitarb.	3.133.776	3.227.789	3.324.623	3.424.361	3.527.092	3.632.905	3.741.892
Jahresgeh.	117.486	121.010	124.641	128.380	132.231	136.198	140.284
SUMME PK	4.841.861	4.987.117	5.136.730	5.290.832	5.449.557	5.613.044	5.781.435
Instandhaltungskosten	13.922.371	12.530.134	14.484.835	17.381.802	17.729.438	18.084.027	18.445.707
sonst. durchsatz.abh.Kosten	26.232.897	20.722.715	21.272.037	21.837.741	22.420.369	22.648.438	23.176.574
durchsatz.unabh.Kosten	6.469.978	6.601.758	6.736.268	6.873.568	7.013.716	7.149.947	7.294.325
Verwaltungskosten	654.198	667.282	680.628	694.240	708.125	722.287	736.733
Gewerbesteuer	2.150.826	3.663.346	3.584.261	3.349.886	3.553.896	3.825.645	4.027.144
Abschreibungen	36.122.616	36.122.616	36.122.616	36.122.616	36.122.616	35.492.723	35.492.723
Zinsen	17.793.783	17.793.783	17.793.783	17.793.783	17.793.783	17.793.783	17.793.783
SUMME KOSTEN	108.188.530	103.088.751	105.811.158	109.344.467	110.791.499	111.329.894	112.748.425
DB III	1.604.198	8.988.857	8.602.735	7.458.433	8.454.483	9.781.256	10.765.044

Zu erahnen aber ist schon die hohe Sensitivität gegenüber dem Brennstoffpreis. Die mathematische Konkretisierung zeigt **Abb. IV.3-1**. Schon bei ca 75 €/t liegt der Interne Zinsfuß bei einem für Investoren kritischen Wert von 6 % (Anmerkung: Langjähriger Erfahrungswert als Renditeerwartung für Kapitalmarktanlagen). Der Wert liegt weit unterhalb der in Kap. III.3 errechneten Gestehungskosten.

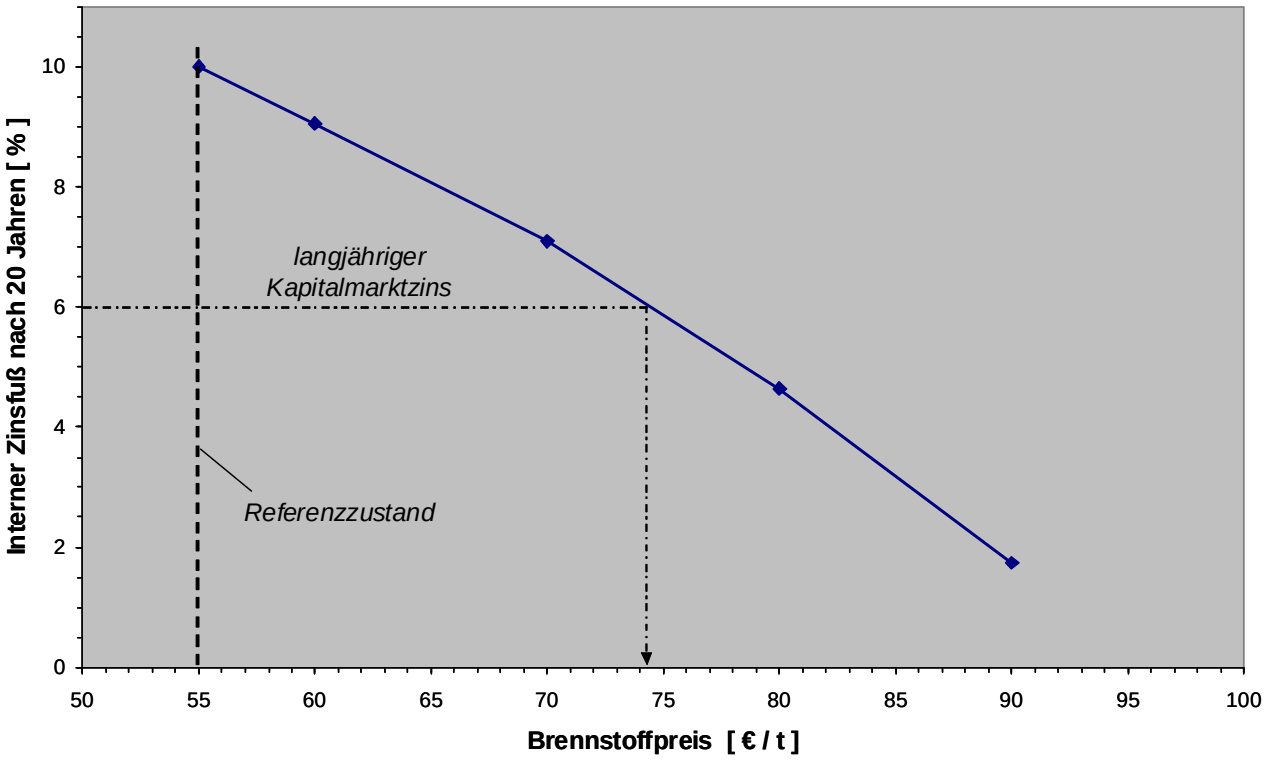


Abb. IV.3-1: Interner Zinsfuß als Funktion des Brennstoffpreises

Ursache für die hohe Empfindlichkeit ist der hohe Anteil des Biomassepreises an den jährlichen Kosten. Selbst bei dem angesetzten niedrigen Preis von 55 €/t liegt der Anteil bei der Modellanlage bei ca. 33 % (s. **Abb. IV.3-2**).

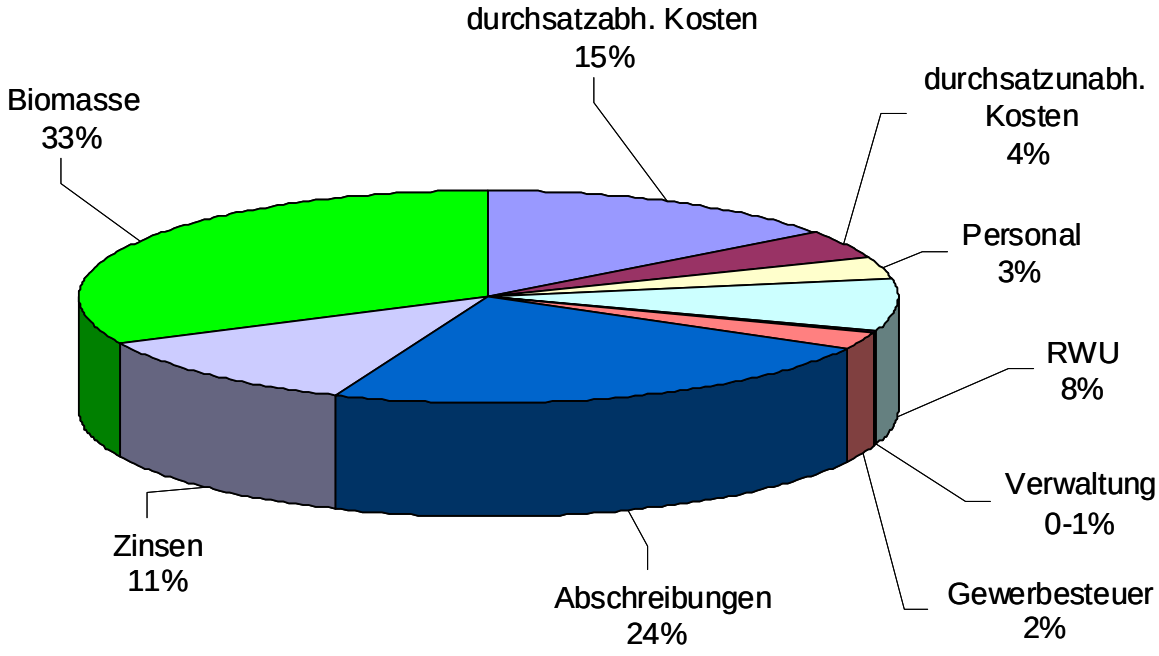


Abb. IV.3-2: Verteilung der jährlichen Gesamtkosten

Interessant ist die Fragestellung, bei welchen Preisen für die Kohlenwasserstoffe ein Pelletpreis von 200,- € pro Tonne zahlbar wäre. Unter den genannten Randbedingungen ergeben sich folgende Werte: Naphta = 900,- €/t, Straight-Run-Diesel = 3.042,- €/t, Wachs = 2.692,- €/t, sofern die Preise alle gleich angehoben werden. Mit einer Dichte des BtL von 0,78 g/l ergäbe sich somit ein Literpreis von 2,37 €/l Rohdiesel. Hinzu kommen die Kosten für die Isomerisierung und Additivierung, Verteilung und die Mineralölsteuer. Es ist absehbar, dass ein Verkaufspreis an der Tankstelle von über **3,0 € / l** notwendig wäre.

An der Graphik ist zu erkennen, dass der Kapitaldienst mit seinen Zinsen und Abschreibungen von noch größerer Bedeutung als der Biomassepreis ist. Der Einfluß auf die Wirtschaftlichkeit ist dementsprechend hoch (s. **Abb. IV.3-3**).

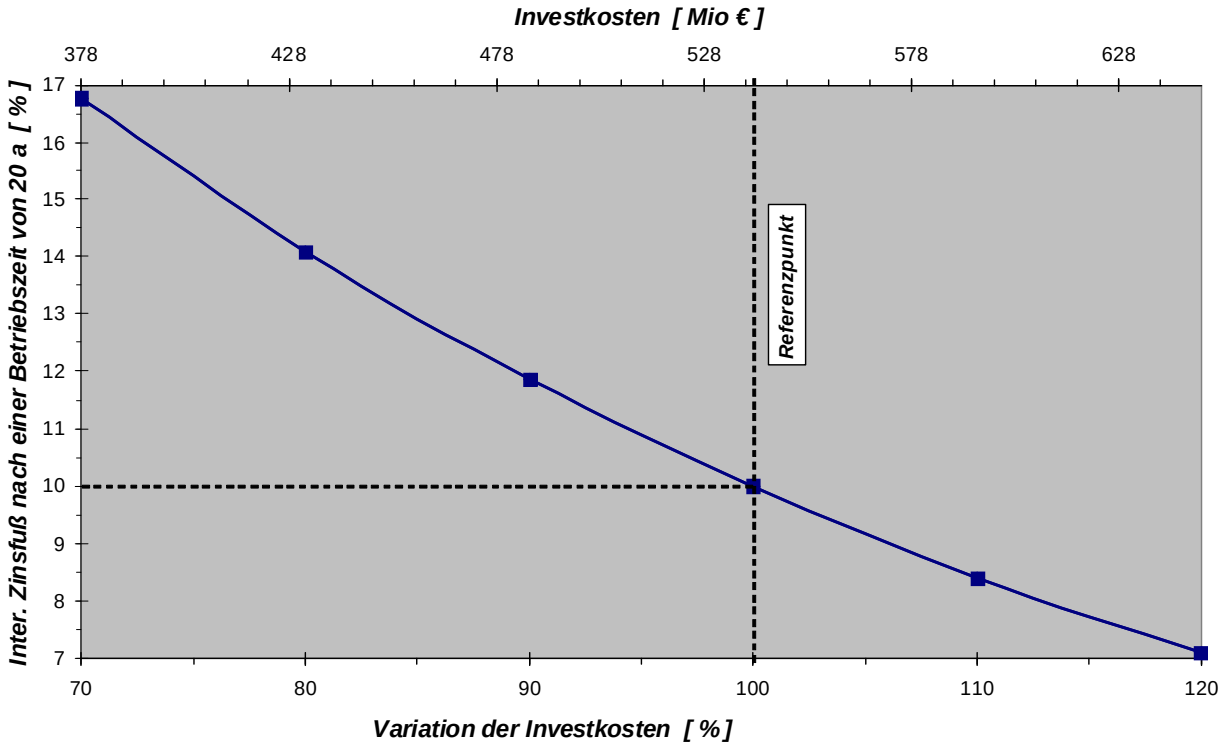


Abb. IV.3-3: Interner Zinsfuß als Funktion des Investes

Sollte es in Zukunft gelingen, durch technische Innovationen den Investbedarf zu drücken, entsteht ein höherer Freiheitsgrad für höhere Brennstoffpreise und/oder niedrigere Produktpreise. Es ist allerdings nicht zu erwarten, dass die Innovationen zu einer so grossen Investkostenabsenkung führen, dass über 200,- €/t Pelletpreis bezahlbar wären.

IV.4 Wirtschaftlichkeitsberechnung nach DIN 2067

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung kleiner Wärmeerzeugungsaggregate, basierend auf fossilen Brennstufen, gab der VDI im Jahr 1957 die erste Fassung der Richtlinie *Richtwerte zur Vorausberechnung der Wirtschaftlichkeit verschiedener Brennstoffe (Koks, Kohle, Heizöl und Gas) bei Warmwasser-Zentralheizungsanlagen* heraus. Das Werk wurde in den vergangenen Jahrzehnten ständig modernisiert. Die Berechnung der Wirtschaftlichkeit erfolgt nach der Annuitätenmethode. Einzelheiten sind in [10] nachzulesen.

In einer Untersuchung der FNR [11] zeigte sich, dass die AfA-Tabellen der DIN 2067 nicht von fossilen Brennstoffen auf Holzheizkraftwerke übertragbar sind. Störstoffe, verklebende Aschen und Kohlenmonoxid-Korrosion setzen die Lebensdauern von Bauteilen im thermischen Bereich herab und vergrößern den Reparaturaufwand. Daher ist es ratsamer, die AfA-Tabellenblätter zur Abfallentsorgungs- und Recyclingwirtschaft anzuwenden.

Für die vorliegende Aufgabenstellung ist angenommen, dass der übliche einfache Gewebefilter einer Holzverbrennung durch einen Filterschichtadsorber mit vorheriger Adsorbenseindüsung erweitert werden muss.

Die der Rechnung zugrunde liegenden Basisdaten zeigt **Tab. IV.4-1**

Tab. IV.4-1: Basisdaten des modellhaften Pelletheizkraftwerkes

Anlagengröße	[$kW_{el,\ installl.}$]	5.000
Durchsatz Pellets	[t_{FS} / h]	4,46
Laufzeit auf Nennlast	[h / a]	7.500
Gesamtlaufzeit der Anlage	[a]	20
Kapitalmarkt-Zinssatz	[% / a]	5
Investkosten		
Gesamt*	[Mio €]	21.000.000
Planung + Gebühren (5,5 % v. Ges.)	[Mio €]	1,16
Bauteil (15,2 % v. Gesamt)	[Mio €]	3,20
Nebenanlagen (2,8 % v. Ges.)	[Mio €]	0,58
Verbrennung / Dampferzeugung (30,9 % v. Ges.)	[Mio €]	6,48
Wärmenutzung / Energieerzeugung (21,9 % v. Ges.)	[Mio €]	4,60
Abgasreinigung (12,8 % v. Ges.)	[Mio €]	2,68
MSR (8,9 % v. Ges.)	[Mio €]	1,86
Standort (0,9 % v. Ges.)	[Mio €]	0,18
Nutzungsdauer Plan und + Gebühren	[a]	15

Nutzungsdauer Bau	[a]	25
Nutzungsdauer Nebenanlagen	[a]	20
Nutzungsdauer Verbrennung/ Dampferzeugung**	[a]	12
Nutzungsdauer Wärmenutzung/Energieerzeugung**	[a]	12
Nutzungsdauer Abgasreinigung**	[a]	12
Nutzungsdauer MSR**	[a]	12
Nutzungsdauer Standort	[a]	20
Betriebskosten		
durchsatzabh. Kosten	[% des Ges.-Invest]	2,2
durchsatzunabh. Kosten	[% des Ges.-Invest]	1,3
RWU	[% des Ges.-Invest]	3,9
Brennstoff	[€ / t_{FS}]	55
Personal	[53.500 € / (a*Person)]	15
Reststoffe	[% des Durchsatzes zu 60 € / t_{RS}]	7
Erlöse		
elektr. Strom***	[ct / kWh]	14,07
spez. Wärmeerlös	[€ / MWh]	20
verkaufbare Wärmeleistung	[MW]	5

*: 4.000 €/kW_{el} bei 5.000 kW_{el} als Schätzwert aus [11] plus 1,- Mio € für Zusatzmaßnahmen in der Abgasreinigung (geschätzt)

**: Gemäß AfA-Tabellenblatt *Abfallentsorgungs- und Recyclingwirtschaft*, Kap. 3 *Abfallbeseitigungsanlagen*; Punkt 3.1 *Müllverbrennungsanlagen für feste Abfälle*

***: 8,25 ct/kWh Grundvergütung + 4,0 ct/kWh NaWaRo-Bonus + 2,25 ct/kWh KWK-Bonus, Inbetriebnahmejahr 2012. Kein Technologiebonus.

IV.5 Ergebnisse für ein Pelletheizkraftwerk

Für die Rechnungen wurde der preisdynamische Annuitätenfaktor aufgeteilt auf die Erlösarten elektrischer Strom (gefördert nach EEG) und Wärme (vergütet als verhandelbares Produkt). Die Steigerungsrate für den Strom ist auf 0 % pro Jahr per Gesetz festgelegt, sofern sich keine Änderungen bei der nutzbaren Wärme ergeben. Für die Wärme wurde angenommen, dass pro Jahr eine Erlössteigerung von 4 % zu erzielen ist.

Das Ergebnis zeigt **Tab. IV.5-1**. Es ist zu sehen, dass die Wirtschaftlichkeit auch bei der Verbrennung in einer dezentralen Anlage mit hoher Wärmenutzung nicht gegeben ist.

Das EEG in der aktuellen Form berücksichtigt einen Technologiebonus für innovative Anlagentechnik. Für Verbrennungsanlagen mit Wasser-/Dampfkreislauf ist er i.d.R. nicht anwendbar, da die Verfahrens- und Apparatetechnik etabliert ist. Im EEG-Teil: Anlage 1, Abschnitt II. *Innovative Anlagentechnik*, Punkt 1 *Anspruchsvoraussetzung*, Unterpunkt h werden aber auch „Techniken zur thermochemischen Konversion ausschließlich von Stroh und anderer halmgutartiger Biomasse“ mit dem Bonus bedacht. Sollte sich der Passus auf die betrachtete Anlagentechnik anwenden lassen, verbessert sich das Ergebnis (s. **Tab. IV.5-2**).

Es verbleibt aber negativ.

Tab. IV.5-1: Ergebnisdarstellung für das beispielhafte Pelletheizkraftwerk ohne Technologiebonus

Allg. Daten: Betrachtungszeitraum = 20 a, Preisänderungsfaktor Instandsetzung r_{IN} = 1,02; Preisänderungsfaktor verbrauchsgebundene Kosten r_V = 1,04; Preisänderungsfaktor betriebsgebundene Kosten r_B = 1,03; Preisänderungsfaktor sonstige Kosten r_S = 1,02; Zinsfaktor q = 1,05

				Synonym	Wieder-beschaffung T [a]	Ersatzbeschaffungen [€]	Restwerte R_W [€]	Annuitätsfaktor a	Faktor Instand-setzung f_K	Barwertfaktor f. Instandsetzung b_{IN}	preisdynamischer Annuitäts-faktor f. Instandsetzung ba_{IN}
Kapitalgebundene Kosten:	**Gesamt**	[€]	21.000.000	$A_{0,\,ges}$							
	Baugruppe										
	Planung + Genehmigung	[€]	1.155.000	$A_{0,\,P+G}$	15	$A_{1,\,P+G}$ = 747.730	390.578	0,0802	3	14,665	1,18
	Bauteil	[€]	3.192.000	$A_{0,\,Bau}$	25		240.606	0,0802	0,5	14,665	1,18
	Nebenanlagen	[€]	588.000	$A_{0,\,NA}$	20		0	0,0802	1	14,665	1,18
	Verbrennung/Dampferzeugung	[€]	6.489.000	$A_{0,\,V+D}$	12	$A_{1,\,V+D}$ = 4.582.561	1.033.886	0,0802	7	14,665	1,18
	Wärmenutzung/Energieerzeugung	[€]	4.599.000	$A_{0,\,W+E}$	12	$A_{1,\,W+E}$ = 3.247.834	732.754	0,0802	3,5	14,665	1,18
	Abgasreinigung	[€]	2.688.000	$A_{0,\,AR}$	12	$A_{1,\,AR}$ = 1.898.278	428.276	0,0802	3,5	14,665	1,18
	MSR	[€]	1.869.000	$A_{0,\,MSR}$	12	$A_{1,\,MSR}$ = 1.319.896	297.786	0,0802	3	14,665	1,18
	Standort	[€]	189.000	$A_{0,\,SO}$	20		0	0,0802	0	14,665	1,18

Annuität der kapitalgebundenen Kosten:	$A_{P+G,\,K} = (A_{0,\,P+G} + A_{1,\,P+G} - R_{W,\,P+G}) * a + f_{K,\,P+G}/100 * A_{0,\,P+G} * ba_{IN,\,P+G}$	162.115
	$A_{Bau,\,K} = (A_{0,\,Bau} - R_{W,\,Bau}) * a + f_{K,\,Bau}/100 * A_{0,\,Bau} * ba_{IN,\,Bau}$	255.609
	$A_{NA,\,K} = (A_{0,\,NA} - R_{W,\,NA}) * a + f_{K,\,NA}/100 * A_{0,\,NA} * ba_{IN,\,NA}$	54.102
	$A_{V+D,\,K} = (A_{0,\,V+D} + A_{1,\,V+D} - R_{W,\,V+D}) * a + f_{K,\,V+D}/100 * A_{0,\,V+D} * ba_{IN,\,V+D}$	1.339.982
	$A_{W+E,\,K} = (A_{0,\,W+E} + A_{1,\,W+E} - R_{W,\,W+E}) * a + f_{K,\,W+E}/100 * A_{0,\,W+E} * ba_{IN,\,W+E}$	760.274
	$A_{AR,\,K} = (A_{0,\,AR} + A_{1,\,AR} - R_{W,\,AR}) * a + f_{K,\,AR}/100 * A_{0,\,AR} * ba_{IN,\,AR}$	444.361
	$A_{MSR,\,K} = (A_{0,\,MSR} + A_{1,\,MSR} - R_{W,\,MSR}) * a + f_{K,\,MSR}/100 * A_{0,\,MSR} * ba_{IN,\,MSR}$	297.973
	$A_{SO,\,K} = (A_{0,\,SO} - R_{W,\,SO}) * a + f_{K,\,SO}/100 * A_{0,\,SO} * ba_{IN,\,SO}$	15.166
	$A_{ges,\,K} = A_{P+G,\,K} + A_{Bau,\,K} + A_{NA,\,K} + A_{V+D,\,K} + A_{W+E,\,K} + A_{AR,\,K} + A_{MSR,\,K} + A_{SO,\,K}$	3.329.582

					Barwertfaktor f.		preisdynamischer Annuitäts-faktor f.
Verbrauchsgebundene Kosten:	(Durchsatzabh. Ko., Reststoffe, Brennstoff)	$A_{N,\,V} = A_{V1} * ba_V$	3.413.605	0,0802	Verbrauch b_V 17,419		Verbrauch ba_V 1,40
Betriebsgebundene Kosten:	Personal	$A_{N,\,B} = A_{B1} * ba_B$	1.028.047	0,0802	Betrieb b_B 15,965		Betrieb ba_B 1,28
Sonstige Kosten:	Durchsatzunabh. Kosten	$A_{N,\,S} = A_{S1} * ba_S$	296.551	0,0802	Sonstiges b_S 14,665		Sonstiges ba_S 1,18
Einnahmen:	Wärme=750 t€/a, Strom=5.276 t€	$A_{N,\,E} = A_{E1} * ba_E$	6.324.302	0,0802	Einnahmen b_E 12,462	17,419	1,00 1,40
Gesamtannuität:		$A_{N,\,netto} = A_{N,\,E} - (A_{ges,\,K} + A_{N,\,V} + A_{N,\,B} + A_{N,\,S})$	-1.743.484				

Tab. IV.5-2: Ergebnisdarstellung für das beispielhafte Pelletheizkraftwerk mit Technologiebonus

Allg. Daten: Betrachtungszeitraum = 20 a, Preisänderungsfaktor Instandsetzung r_{IN} = 1,02; Preisänderungsfaktor verbrauchsgebundene Kosten r_V = 1,04; Preisänderungsfaktor betriebsgebundene Kosten r_B = 1,03; Preisänderungsfaktor sonstige Kosten r_S = 1,02; Zinsfaktor q = 1,05

				Synonym	Wiederbeschaffung T [a]	Ersatzbeschaffungen [€]	Restwerte R_W [€]	Annuitätsfaktor a	Faktor Instandsetzung f_K	Barwertfaktor f. Instandsetzung b_{IN}	preisdynamischer Annuitätsfaktor f. Instandsetzung ba_{IN}
Kapitalgebundene Kosten:	**Gesamt**	[€]	21.000.000	$A_{0,\,ges}$							
	Baugruppe										
	Planung + Genehmigung	[€]	1.155.000	$A_{0,\,P+G}$	15	$A_{1,\,P+G}$ = 747.730	390.578	0,0802	3	14,665	1,18
	Bauteil	[€]	3.192.000	$A_{0,\,Bau}$	25		240.606	0,0802	0,5	14,665	1,18
	Nebenanlagen	[€]	588.000	$A_{0,\,NA}$	20		0	0,0802	1	14,665	1,18
	Verbrennung/Dampferzeugung	[€]	6.489.000	$A_{0,\,V+D}$	12	$A_{1,\,V+D}$ = 4.582.561	1.033.886	0,0802	7	14,665	1,18
	Wärmenutzung/Energieerzeugung	[€]	4.599.000	$A_{0,\,W+E}$	12	$A_{1,\,W+E}$ = 3.247.834	732.754	0,0802	3,5	14,665	1,18
	Abgasreinigung	[€]	2.688.000	$A_{0,\,AR}$	12	$A_{1,\,AR}$ = 1.898.278	428.276	0,0802	3,5	14,665	1,18
	MSR	[€]	1.869.000	$A_{0,\,MSR}$	12	$A_{1,\,MSR}$ = 1.319.896	297.786	0,0802	3	14,665	1,18
	Standort	[€]	189.000	$A_{0,\,SO}$	20		0	0,0802	0	14,665	1,18

Annuität der kapitalgebundenen Kosten:		
	$A_{P+G,\,K} = (A_{0,\,P+G} + A_{1,\,P+G} - R_{W,\,P+G}) * a + f_{K,\,P+G}/100 * A_{0,\,P+G} * ba_{IN,\,P+G}$	**162.115**
	$A_{Bau,\,K} = (A_{0,\,Bau} - R_{W,\,Bau}) * a + f_{K,\,Bau}/100 * A_{0,\,Bau} * ba_{IN,\,Bau}$	**255.609**
	$A_{NA,\,K} = (A_{0,\,NA} - R_{W,\,NA}) * a + f_{K,\,NA}/100 * A_{0,\,NA} * ba_{IN,\,NA}$	**54.102**
	$A_{V+D,\,K} = (A_{0,\,V+D} + A_{1,\,V+D} - R_{W,\,V+D}) * a + f_{K,\,V+D}/100 * A_{0,\,V+D} * ba_{IN,\,V+D}$	**1.339.982**
	$A_{W+E,\,K} = (A_{0,\,W+E} + A_{1,\,W+E} - R_{W,\,W+E}) * a + f_{K,\,W+E}/100 * A_{0,\,W+E} * ba_{IN,\,W+E}$	**760.274**
	$A_{AR,\,K} = (A_{0,\,AR} + A_{1,\,AR} - R_{W,\,AR}) * a + f_{K,\,AR}/100 * A_{0,\,AR} * ba_{IN,\,AR}$	**444.361**
	$A_{MSR,\,K} = (A_{0,\,MSR} + A_{1,\,MSR} - R_{W,\,MSR}) * a + f_{K,\,MSR}/100 * A_{0,\,MSR} * ba_{IN,\,MSR}$	**297.973**
	$A_{SO,\,K} = (A_{0,\,SO} - R_{W,\,SO}) * a + f_{K,\,SO}/100 * A_{0,\,SO} * ba_{IN,\,SO}$	**15.166**
	$A_{ges,\,K} = A_{P+G,\,K} + A_{Bau,\,K} + A_{NA,\,K} + A_{V+D,\,K} + A_{W+E,\,K} + A_{AR,\,K} + A_{MSR,\,K} + A_{SO,\,K}$	**3.329.582**

						Barwertfaktor f. Verbrauch b_V		preisdynamischer Annuitätsfaktor f. Verbrauch ba_V	
Verbrauchsgebundene Kosten:	(Durchsatzabh. Ko., Reststoffe, Brennstoff)	$A_{N,\,V} = A_{V1} * ba_V$	**3.413.605**	0,0802		17,419		1,40	
Betriebsgebundene Kosten:	Personal	$A_{N,\,B} = A_{B1} * ba_B$	**1.028.047**	0,0802		Barwertfaktor f. Betrieb b_B 15,965		preisdynamischer Annuitätsfaktor f. Betrieb ba_B 1,28	
Sonstige Kosten:	Durchsatzunabh. Kosten	$A_{N,\,S} = A_{S1} * ba_S$	**296.551**	0,0802		Barwertfaktor f. Sonstiges b_S 14,665		preisdynamischer Annuitätsfaktor f. Sonstiges ba_S 1,18	
Einnahmen:	Strom=6.004 t€, Wärme=750 t€/a	$A_{N,\,E} = A_{E1} * ba_E$	**7.052.027**	0,0802		Barwertfaktor f. Einnahmen b_E 12,462	17,419	preisdynamischer Annuitätsfaktor f. 1,00	1,40
Gesamtannuität:		$A_{N,\,netto} = A_{N,\,E} - (A_{ges,\,K} + A_{N,\,V} + A_{N,\,B} + A_{N,\,S})$	***-1.015.759***						

IV.6 Zusammenfassung

Die thermische Nutzung der Pellets wurde betriebswirtschaftlich betrachtet für die Varianten der Vergasung und Nutzung des Synthesegases zur BtL-Herstellung sowie die Verbrennung mit Erzeugung von Strom und Wärme.

Technische Grundlage für die BtL-Betrachtung bildete eine 500 MW_{therm}-Anlage und einem Input von 889.277 t Pellets pro Jahr. Die Verbrennung wurde, obwohl technisch fragwürdig, in einer 5 MW_{el}-Anlage angesetzt mit einem Brennstoffbedarf von 33.450 t Pellets pro Jahr.

Die Rechnungen zeigten in beiden Fällen, dass sich bei einem in Kap. III.3 ermittelten Gestehungspreis von mehr als 200 €/t kein wirtschaftlicher Betrieb erzielen läßt. Die BtL-Anlage benötigt einen Biomassepreis in der Größenordnung von 50 €/t, um überhaupt in wirtschaftliche Bereiche bei den marktwirtschaftlich durchsetzbaren Preisen für die Kohlenwasserstoffprodukte kommen zu können. Dabei liegt der notwendige Dieselpreis von ca 1,30 € pro Liter plus Aufbereitungskosten für die Isomerisierung und Additivierung sowie der Verteilung und Mineralölsteuer heute noch weit über den aktuellen Preisen an den Tankstellen.

Bei einem Pelletpreis von 200 €/t läge der Preis für Straight-Run-Diesel an der Abgabegrenze zur Aufbereitung bei ca 2,40 €/l unter den hier angesetzten Randbedingungen, was einen Abgabepreis an der Tankstelle von über 3,0 €/l bedeuten würde. Der Wert scheint nach dem jetzigen Erkenntnisstand nicht durchsetzbar zu sein. Selbst durch technische Innovationen und der Herabsetzung des Investaufwandes auf Seiten der BtL-Anlage entstehen keine großen kommerziellen Chancen.

Ähnlich sieht es bei der Verbrennungsanlage aus. Obwohl durch den dezentralen Charakter ein höherer Wirkungsgrad als bei der BtL-Anlage angenommen werden kann, wenn Wärme in nennenswertem Ausmaß verkaufbar ist, stellt sich kein wirtschaftlicher Betrieb bei Bezugspreisen von über 55,- €/t Pellets ein.

Mit den angesetzten Werten liegt der Erlös der Strom- und Wärmeerzeugung bei 210,- €/t Pellet (incl. Technologiebonus des EEG) in der gleichen Größenordnung wie bei der BtL-Erzeugung (hier ca 204,- €/t Pellet).

IV.7 Verwendete Unterlagen

[1] EU-Project *RENEW*: Contract No SES6-CT-2003-502705; Abschlußbericht (Renew-final-report-080627.pdf), http://www.renew-fuel.com/fs-documents.php, 2008

[2] Henrich, E., Dinjus, E.: *Das FZK-Konzept zur Kraftstoffherstellung aus Biomasse*, Symposium *Biomasse-Vergasung - Der Königsweg für eine effiziente Strom- und Kraftstoffbereitstellung*, 1. bis 2. Oktober 2003, Leipzig

[3] Bohlmann, J.: *Biokraftstoffe der zweiten Generation: Herstellungsoptionen, Stand der Technik, Effizienz, Kosten*; *Tagung Mobil mit Biomasse*, Stuttgart, 27.09.2006

[4] Vodegel, S.; Grove, A. K.; Benker, B.: *Neueste Ergebnisse zur Vergasung in der zirkulierenden Wirbelschicht*; in *Energie aus Abfall*, Bd. 5; 2008, Hrsg.: Thomé-Kozmiensky,

K.J.; Beckmann, M.; TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, ISBN 978-3-935317-34-4, S. 373-383

[5] *Studie "Anforderungen an Biomasse zur Kraftstoffherstellung aus der Sicht von Anlagenbetreibern"*, erstellt durch CUTEC-Institut GmbH, Förderer: BMELV über FNR sowie Fa. Volkswagen AG (Wolfsburg), FKZ 22010404, 2006

[6] CHEMIE TECHNIK: Baupreisindex für Chemieanlagen, baupreisindex_29_07_2008.pdf, Verlag Hüthig, Heidelberg, 2008

[7] Schindler, M.; Lührs, T.: *Ökonomische Beurteilung des Anbaupotenzials für Biomasse in drei ausgewählten Regionen Niedersachsens*, Abschlußbericht der Länderkooperation „Biomasse für SunFuel“, Hrsg.: 3 N—Kompetenzzentrum Niedersachsen (Wehrlte), 2008, S. 13-20.

[8] -: *Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau*; Hrsg.: Hydro Agri Dülmen GmbH (Dülmen), Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup, 12. Aufl., 1993

[9] Auskunft Niedersächsisches Landvolk, Kreisverband Hildesheim-Marienburg e.V., 2008

[10] VDI-Richtlinie 2067, Blatt 1: *Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung*, September 2000

[11] *Studie "Datensammlung Bioenergie für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen nach der Methodik der VDI-Richtlinie 2067"*, erstellt durch CUTEC-Institut GmbH, Förderer: BMELV über FNR, FKZ 22022205, 2007

IV.8 Abbildungsverzeichnis

Abb. IV.1-1 Grundfließbild ArtFuel-Konzept S. 125

Abb. IV.2-1 Aufbau der dynamischen Wirtschaftlichkeitsberechnung S. 127

Abb. IV.3-1 Interner Zinsfuß als Funktion des Brennstoffpreises S. 130

Abb. IV.3-2 Verteilung der jährlichen Gesamtkosten S. 130

Abb. IV.3-3 Interner Zinsfuß als Funktion des Investes S. 131

IV.9 Tabellenverzeichnis

Tab. IV.2-1 Basisdaten der dynamischen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung S. 128

Tab. IV.3-1 Ergebnisdarstellung für die ersten 7 Betriebsjahre der BtL-Modellanlage S. 129

Tab. IV.4-1 Basisdaten des modellhaften Pelletheizkraftwerkes S. 132

Tab. IV.5-1 Ergebnisdarstellung für das beispielhafte Pelletheizkraftwerk ohne Technologiebonus S. 135

Tab. IV.5-2 Ergebnisdarstellung für das beispielhafte Pelletheizkraftwerk mit Technologiebonus S. 136

V. Ökologische Auswertung der Gesamtketten

V.1 Einführung

Hintergrund und Erkenntnisinteresse

Begünstigt durch ökonomische und politische Rahmenbedingungen haben biogene Kraft- und Brennstoffe in der jüngsten Vergangenheit an Bedeutung gewonnen. Langjährige Steuerbefreiungen aber auch die 2007 eingeführte Quotenverpflichtung trugen dazu bei, dass flüssige Biokraftstoffe wie reines Pflanzenöl, Biodiesel und Bioethanol im Jahr 2007 einen Anteil von immerhin 7,3% am Gesamtkraftstoffverbrauch erreichten. Doch über diese etablierten Biokraftstoffe aus Öl-, Zucker- und Stärkepflanzen hinaus könnten noch erhebliche Potenziale erschlossen werden, wenn es gelänge, Ganzpflanzen für die Herstellung synthetischer Biokraftstoffe nutzbar zu machen. Frisch geerntete Biomasse wie Ganzpflanzen ist aber aufgrund ihres hohen Wassergehaltes nicht konservierbar und relativ energiearm, was längere Transporte unwirtschaftlich macht. Die Herausforderung besteht also darin, sie in eine lagerfähige, energiereiche und transportwürdige Form – z. B. in Pellets – zu überführen, was die Versorgung großer BtL-Anlagen oder Kraftwerke überhaupt erst ermöglichen würde.

Genau dieser Herausforderung widmet sich das Verbundvorhaben BioLog, das neue Logistikkonzepte für Biobrennstoffe entwickelt, erprobt und demonstriert. Aufbauend auf dem Zweikulturnutzungssystem sieht es vor, die frisch geerntete Biomasse zu silieren und in einem dezentralen Pelletwerk durch Pressen und Trocknen von der Flüssigkeit zu trennen, welche in der integrierten Biogasanlage genutzt wird. Die so produzierten Pellets können dann in zentralen BtL-Anlagen oder Heizkraftwerken genutzt werden (siehe **Abb. V.1-1**).

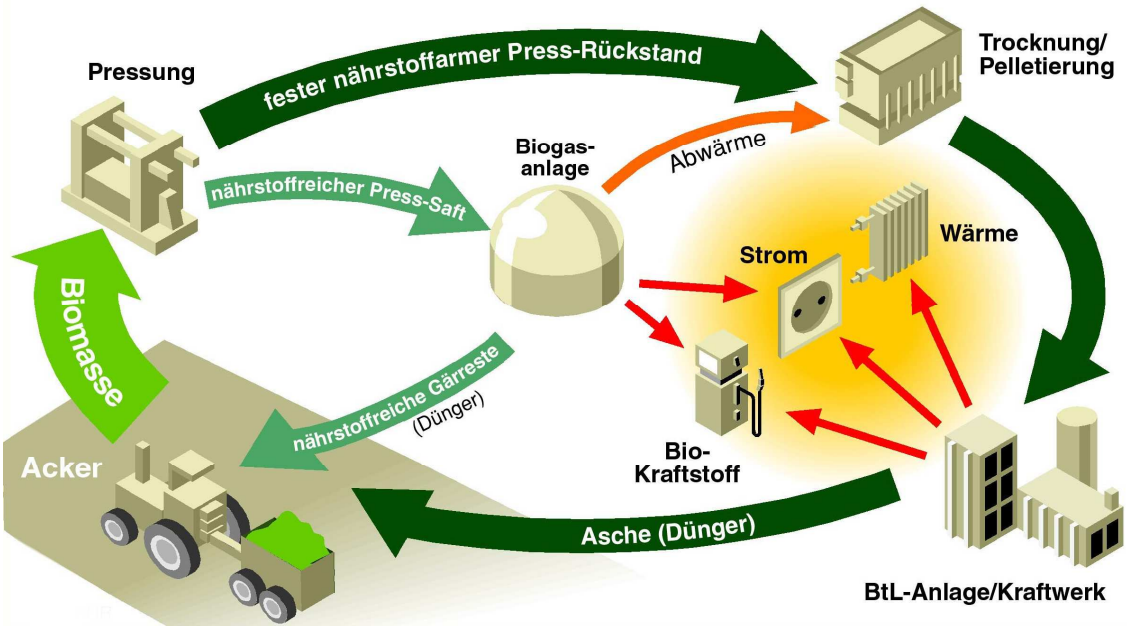


Abb. V.1-1: Biokraftstoff- bzw. Bioenergiegewinnung nach dem BioLog-Konzept /FNR 2009/

Im Rahmen des Verbundvorhabens wurde das Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU) mit der Bearbeitung des Teilvorhabens „Ökologische Begleitforschung“ beauftragt. Das Teilvorhaben hat die Aufgabe, projektbegleitend die Umweltwirkungen der (Zwischen-) Ergebnisse und Planungen des Verbundvorhabens zu untersuchen.

Ziel der Untersuchung

Ziel der Studie ist die Analyse der Umweltwirkungen der BioLog-Bioenergieträger, auf deren Grundlage eine ökologische Bewertung des BioLog-Konzepts vorgenommen wird. Dabei soll insbesondere untersucht werden

- wie ökologisch die analysierten BioLog-Bioenergieträger unter *heutigen* Produktionsbedingungen im Vergleich zur Bereitstellung und Nutzung fossiler Kraft- und Brennstoffe sind,
- inwiefern die besonders ergebnisrelevanten Lebenswegabschnitte aus Umweltschutzsicht optimiert werden können und
- wie die analysierten BioLog-Bioenergieträger unter *zukünftigen* Produktionsbedingungen im Vergleich zu anderen biogenen Kraft- und Brennstoffen, d. h. zu alternativen Biomasse- und Flächennutzungen, abschneiden.

Grundsätzliche Vorgehensweise

Die Untersuchung wird in Anlehnung an die Vorgehensweise bei Ökobilanzen durchgeführt, welche in Kapitel V.2 ausführlich beschrieben wird. Dieser Vorgehensweise zufolge sind die gesamten Lebenswege der Bioenergieträger vom Energiepflanzenanbau über die Verarbeitung zu Biokraftstoffen oder -brennstoffen bis hin zu deren energetischer Nutzung im Vergleich zu fossilen Energieträgern zu betrachten. Einen solchen vereinfachten Lebenswegvergleich zeigt **Abb. V.1-2**.

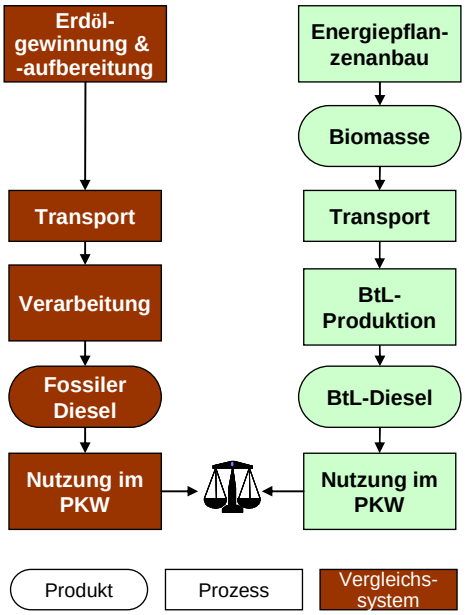


Abb. V.1-2: Vereinfachter schematischer Lebenswegvergleich zwischen fossilem Dieselkraftstoff und BtL-Diesel aus BioLog-Pellets (Mischung aus Gras, Roggen und Mais)

V.2 Methodik und Vorgehensweise

Die Ökobilanzen wurden in Anlehnung an die Vorgehensweise bei Produkt-Ökobilanzen nach DIN 14040 und 14044 (/DIN 2006/) durchgeführt. Aufgrund der Art des Erkenntnisinteresses wurden nur übersichtsartige Bilanzen angefertigt, die keiner (wie in den Normen vorgeschrieben) externen Begutachtung unterzogen wurden. Dennoch können die Ergebnisse durch die enge Anlehnung an die Normen als sehr belastbar angesehen werden.

Im Folgenden werden die wesentlichen Details zur grundsätzlichen Vorgehensweise präsentiert, allgemeine Festlegungen sowie analysierte Umweltwirkungen beschrieben und die Ableitung der Basisdaten dokumentiert. Details finden sich in der angegebenen Literatur.

Methodische Vorgehensweise

Das Vorgehen zur Erstellung einer Produkt-Ökobilanz ist in den DIN-Normen 14040 und 14044 geregelt. Betrachtet werden insbesondere

- die Input- und Outputflüsse (Roh- und Werkstoffe, Energie bzw. Abfälle, Abwasser, Emissionen etc.) und
- potenzielle Umweltwirkungen (z. B. Treibhauseffekt, Versauerung) des betrachteten Produktsystems (Produkt oder Dienstleistung)
- entlang seines gesamten Lebenswegs („von der Wiege bis zur Bahre“, von der Rohstoffförderung bis zur Entsorgung).

Damit liefern die Produkt-Ökobilanzen umfassende Informationen zu den ökologischen Wirkungen sowohl über einzelne Produktionsstufen als auch über den gesamten Lebensweg von Produkten und Dienstleistungen. Über Sensitivitätsanalysen lassen sich insbesondere auch Optimierungspotenziale und über die Interpretationen Informationen für Entscheidungsprozesse ableiten.

Allgemeine Festlegungen

Die wesentlichen Festlegungen in dieser Studie sind:

- **Funktionelle Einheit**: Die funktionelle Einheit bezeichnet die spezifische Produktmenge oder -dienstleistung, die zur Erzeugung des betrachteten Produktnutzens benötigt wird. Für die Fragestellungen in dieser Studie wird der Nutzen aus einem Hektar Anbaufläche in einem Durchschnittsjahr betrachtet. Dabei wird angesetzt, dass 20 % der Fläche zur Erzeugung von Gras und 80 % der Fläche zur aufeinander folgenden Erzeugung von Roggen und Mais (Zweikulturnutzungssystem) verwendet werden.
- **Geografischer und zeitlicher Bezug**: Der Bezugsraum für die Produktion und Nutzung der Bioenergieträger ist die Bundesrepublik Deutschland. Für Rohstoffe aus anderen Ländern (z. B. Import von Düngemitteln und Erdöl) wird der Bezugsraum entsprechend erweitert. Es werden drei Bezugszeiträume gewählt, insbesondere um mögliche Technologie-entwicklungen in den Bereichen Entwässerung, Trocknung und BtL-Produktion abzubilden: Heute (2008), 2010 (kurzfristig) und 2020 (mittelfristig). Grundsätzliche Details zu Bezugsraum und -zeitraum finden sich in /Borken et al. 1999/.
- **Systemgrenzen**: Grundsätzlich wird der so genannten Systemraumerweiterung Vorrang vor der Allokation eingeräumt (Näheres siehe /Borken et al. 1999/). Dabei erhalten

Kuppelprodukte Gutschriften für vermiedene Umweltwirkungen, die mit der Produktion nutzenäquivalenter Produkte verbunden wären. Beispielsweise wird dem nährstoffreichen Gärrest aus der Biogasanlage (Teil des Pelletwerks) eine Gutschrift für vermiedene Umweltwirkungen aus der Produktion von mineralischen Düngemitteln erteilt, welche durch den Gärrest ersetzt werden.

- **Bilanzierungstiefe**: Sämtliche stofflichen und energetischen Inputs und Outputs sowie die potenziellen Umweltwirkungen des betrachteten Produktsystems werden entlang des gesamten Lebenswegs bilanziert. Lediglich die Infrastruktur (Bau von Konversionsanlagen, Fahrzeugen und Verkehrswegen) wird nicht berücksichtigt.

Basisdaten

Die für die Übersichtsökobilanzen verwendeten Basisdaten stammen sowohl von den BioLog-Projektpartnern als auch aus der IFEU-internen Datenbank. Im Einzelnen sind dies:

- **BioLog-Lebenswege**
  - Energiepflanzenanbau: Ernteerträge wurden von /ATB 2008/ und /TLL 2008/ übernommen, die anbauspezifischen Aufwendungen von /IFEU 2009/
  - Silagetransport: Angaben zu Transportentfernungen stammen von /TLL 2008/, Transportmittel und Nutzlasten von /IFEU 2009/
  - Biomassekonversion: Sämtliche prozessspezifischen Daten wurden durch die BioLog-Projektpartner zur Verfügung gestellt und durch das IFEU auf Vollständigkeit und Konsistenz überprüft: /ATB 2008/ (Ernte und Silierung), /FZK 2008/ (Elektroporation), /Anhydro 2008/ und /Rinder 2008/ (mechanische Entwässerung), /Abdoun 2008/ (Biogasanlage), /A. Kahl 2008/ und /Sternowsky 2008/ (thermische Trocknung und Pelletierung) sowie /Vodegel 2008/ (BtL-Produktion nach dem ArtFuel-Konzept)
  - Bereitstellung und Nutzung von Äquivalenzprodukten: Im Wesentlichen wurde /IFEU 2009/ herangezogen, mit Ausnahme der Mineraldüngeräquivalente für Filterasche und Gärrest /Beck 2008/
  - Pellettransport und energetische Nutzung von BtL-Diesel und Pellets: /IFEU 2009/
- **Fossile Pfade**
  - Bereitstellung und Nutzung von fossilen Energieträgern: /IFEU 2009/
- **Alternative Bioenergie-Lebenswege** (siehe auch Zusammenstellung im Anhang 0)
  - BtL aus Pappel und Triticale (nach dem Carbo-V®-Verfahren): /IFEU 2006/
  - Biogas- / Biomethan aus BioLog-Biomassemix: Angepasst nach /IFEU et al. 2008/

Analysierte Umweltwirkungen

Zunächst werden die in dieser Studie bilanzierten Umweltwirkungen näher erläutert (**Tab. V.2-1**) und anschließend die dazugehörigen Indikatoren, Sachbilanzgrößen und Äquivalenzfaktoren dargestellt (**Tab. V.2-2**).

Tab. V.2-1: Indikatoren, Sachbilanzgrößen und Äquivalenzfaktoren zu den untersuchten Umweltwirkungen

Umweltwirkung	Beschreibung
Energie	Energieverbrauch bzw. -einsparung ist ein Indikator der Ressourcenbeanspruchung. In dieser Studie dargestellt sind die nicht-erneuerbaren Primärenergieträger Erdöl, Erdgas und Kohle sowie Uranerz. Im Folgenden wird diese Umweltwirkung der neutraleren Begrifflichkeit wegen mit „Energie“ bezeichnet und in dieser Studie die Einsparung bzw. der Mehrverbrauch von nicht-erneuerbaren Energieträgern in GJ Primärenergie angegeben.
Treibhauseffekt	Bezeichnet die Erwärmung der Atmosphäre in Folge der vom Menschen verursachten Freisetzung von klimawirksamen Gasen. In Ökobilanzen wird nur der anthropogene Treibhauseffekt betrachtet. Es werden Kohlendioxid (CO_2) aus der Verbrennung fossiler Energieträger sowie Methan und Lachgas berücksichtigt. Alle Gase werden nach vorgegebenen Faktoren in CO_2-Äquivalente umgerechnet und in dieser Studie in t CO_2-Äquivalenten angegeben.
Versauerung	Verschiebung des Säuregleichgewichts in Böden und Gewässern durch den Eintrag der Säure bildenden Luftschadstoffe Schwefeldioxid, Stickoxide, Ammoniak und Chlorwasserstoff in Böden und Gewässer (Stichwort „saurer Regen“). Auch diese Luftschadstoffe werden mit Äquivalenzfaktoren umgerechnet und in dieser Studie in kg SO_2-Äquivalenten angegeben.
Nährstoffeintrag	Einbringung von einem Übermaß an Nährstoffen in Böden (terrestrische Eutrophierung) über die Luftschadstoffe Stickoxide und Ammoniak. Diese Luftschadstoffe werden mit Äquivalenzfaktoren in PO_4-Äquivalente umgerechnet und in dieser Studie in kg PO_4-Äquivalenten angegeben.
Fotosmog	Bildung von so genannten Fotooxidantien wie z. B. Ozon unter dem Einfluss von Sonnenstrahlung in bodennahen Luftschichten (Stichwort „Ozonalarm“) durch Zusammenwirken mehrerer Faktoren, zu denen Sonneneinstrahlung, Stickoxide und ungesättigte Kohlenwasserstoffe gehören. Die Äquivalenzfaktoren zur Bewertung des Fotosmogs wurden in den letzten Jahren signifikant verändert. So wurde noch 2004 auch der Summenparameter NMVOC mit in die Bewertung einbezogen, während seit 2007 nur noch die Einzelsubstanzen betrachtet werden, da nicht geklärt ist, wie der Summenparameter ohne hinreichendes Wissen über seine genaue Zusammensetzung bewertet werden soll. Für die Einzelsubstanzen sind allerdings oft keine Daten vorhanden. Um die Umweltwirkung Fotosmog dennoch abbilden zu können, wird in dieser Studie daher trotzdem auf den Summenparameter und die Werte von 2004 zurückgegriffen. Letztere beinhalten auch Äquivalenzfaktoren für NO und NO_2 (mit gegensätzlichem Vorzeichen), aber auch hier liegen in der Regel nur Daten zum Summenwert NO_X vor, der aufgrund der unterschiedlichen Vorzeichen nicht sinnvoll aufgelöst werden kann. Deswegen wird zur Bewertung der Stickoxide auf eine andere Methode zurückgegriffen und dem POCP noch das stickstoffkorrigierte Ozonbildungspotenzial NcPOCP gegenüber gestellt.

Lachgas (Ozonabbau)	Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre durch bestimmte Gase wie FCKW, die ein bestimmtes Ozonabbaupotenzial aufweisen und üblicherweise in FCKW-Äquivalenten angegeben werden (Stichwort „Ozonloch“). Auch Lachgas wirkt sich auf Veränderungen in der Ozonschicht aus, es existiert aber noch kein Äquivalenzfaktor zur Konvertierung in FCKW-Äquivalente, da unklar ist, in welchem Maße eine Wirkung besteht. Zwar hat Lachgas (N_2O) durch Einbindung in molekulare Mechanismen auf das stratosphärische Ozon einen Einfluss, es besteht aber bisher kein wissenschaftlicher Konsens, inwieweit es den Ozonabbau fördert oder verlangsamt. Da FCKW hier nicht von Bedeutung sind, Lachgas dagegen in signifikanten Mengen emittiert wird, wird als ozonrelevantes Gas nur Lachgas in kg N_2O betrachtet.

Tab. V.2-2: Indikatoren, Sachbilanzgrößen und Äquivalenzfaktoren zu den untersuchten Umweltwirkungen (/CML 2004/, /IPCC 2007/, /Klöpffer & Renner 1995/, /Leeuw 2002/, /IFEU 2009/ auf der Basis von /IPCC 2007/)

Umweltwirkung	Indikator	Sachbilanzgröße	Formel	Äquivalenz-faktor
Energie[1]	Kumulierter Primärenergieaufwand aus nicht-erneuerbaren Quellen	Erdöl	—	—
		Erdgas		
		Steinkohle		
		Braunkohle		
		Uranerz		
Treibhauseffekt	CO_2-Äquivalent (Kohlendioxid-Äquivalent)	Kohlendioxid fossil	CO_2	1
		Lachgas (Distickstoffoxid)	N_2O	298
		Methan biogen	CH_4	25
		Methan fossil	CH_4	27,75
Nährstoffeintrag	PO_4-Äquivalent (Phosphat-Äquivalent)	Stickoxide	NO_X	0,13
		Ammoniak	NH_3	0,346
Versauerung	SO_2-Äquivalent (Schwefeldioxid-Äquivalent)	Schwefeldioxid	SO_2	1
		Stickoxide	NO_X	0,7
		Ammoniak	NH_3	1,88
		Chlorwasserstoff	HCl	0,88
Fotosmog - POCP	C_2H_4-Äquivalent (Ethen-Äquivalent)	Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe	NMHC	1
		Methan	CH_4	0,006
Fotosmog - NcPOCP	Stickstoffkorrigierte C_2H_4-Äquivalente	Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe	NMHC	—
		Methan	CH_4	—
		Stickoxide	NO_X	—
N_2O (Ozonabbau)	—	Lachgas (Distickstoffoxid)	N_2O	—

[1] Energieeinsparung und -verbrauch ist eine Unterkategorie der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung. Damit werden hier die nicht-erneuerbaren Primärenergieträger Erdöl, Erdgas, Kohle und Uranerz beschrieben.

Ergebnisdarstellung

In den Ergebnisgrafiken werden jeweils die Differenzen zwischen dem Saldo aus Aufwendungen und Gutschriften der Bioenergieträger-Nutzung und den Gutschriften aus den ersetzten fossilen Energieträgern dargestellt und – orientiert an den Bedürfnissen eines „schnellen“ Lesers – kurz diskutiert. Die grafische Darstellung erfolgt in der für die jeweilige Umweltwirkung gebräuchlichen Einheit.

Bei der Beschreibung der Umweltwirkungen (siehe u. a. **Tab. V.2-1**) sowie der Ergebnisse wird einfach verständlichen Begriffen Vorrang gegenüber wissenschaftlich exakten Darstellungen eingeräumt, beispielsweise „Versauerung“ anstelle von „Versauerungspotenzial auf der Basis von SO_2-Äquivalenten“.

V.3 Analysierte BioLog-Lebenswege

In diesem Kapitel werden die BioLog-spezifischen Lebenswege (Bioenergiepfade), Varianten und Optimierungsmöglichkeiten im Detail erläutert. Zunächst werden in den Kapiteln V.3.1 und V.3.2 zwei Basis-Lebenswege präsentiert. In beiden Fällen werden Pellets aus silierter Biomasse hergestellt, welche im Lebensweg 1 zur Herstellung eines synthetischen Biokraftstoffs (Biomass-to-Liquid, BtL) genutzt werden, während sie im Lebensweg 2 zur Strom- und Wärme-Produktion (Kraft-Wärme-Kopplung, KWK) eingesetzt werden. Der Begriff „Basis-Lebensweg“ impliziert dabei, dass neben den Stoff- und Energieströmen weitere Parameter wie Pelletwerkgröße, Entwässerungs- und Trocknungstechnologie, verwendete Energieträger und Wirkungsgrade festgelegt sind. Auf dieser Grundlage werden dann im Kapitel V.3.3 Varianten und Optimierungsmöglichkeiten vorgestellt.

Ursprünglich sollten noch zwei weitere Lebenswege untersucht werden, bei denen die Biomasse entweder vor der Silierung elektroporiert wird (Lebensweg 3) oder nach Ernte und Elektroporation, d. h. ohne Silierung, direkt weiterverarbeitet wird (Lebensweg 4). Eine Kombination von Elektroporation und Silierung wurde jedoch als nicht sinnvoll angesehen, da die Silierung – neben der Konservierung der Biomasse – zu einem vollständigen Zellaufschluss führt, welcher durch eine vorgelagerte Elektroporation nicht verbessert wird. Aus diesem Grund wurde Lebensweg 3 nicht weiter betrachtet. Mit Lebensweg 4 wären durch die fehlende Silierung (Konservierung) große logistische und ökonomische Herausforderungen verbunden. Er wird daher nur in Form einer Variantenanalyse betrachtet.

Auf eine detaillierte Dokumentation der alternativen Bioenergie-Lebenswege haben wir an dieser Stelle verzichtet. Die wichtigsten Konversionsparameter sind im Anhang im Kapitel V.10 zusammengestellt, weitere Details finden sich in /IFEU 2006/ und /IFEU et al. 2008/.

V.3.1 Lebensweg 1: Kraftstoffherstellung (BtL-Pfad)

Abb. IV.3.1-1 zeigt die BtL-Herstellung nach dem BioLog-Konzept (Lebensweg 1). Als Energiepflanzen werden Gras, Roggen und Mais angebaut, wobei 20 % der Fläche zur Erzeugung von Gras und 80 % der Fläche zur aufeinander folgenden Erzeugung von Roggen und Mais (Zweikulturnutzungssystem) verwendet werden. Die frisch geerntete Biomasse wird siliert, dabei gleichzeitig konserviert und steht ganzjährig der Weiterverarbeitung zur Verfügung.

Nach der Silierung wird das Material zu einem dezentralen Pelletwerk transportiert, wo die Silage mittels Schneckenpresse entwässert (auf 45 % TM-Gehalt), danach mittels Bandtrockner

getrocknet (auf 89 % TM-Gehalt) und anschließend pelletiert wird. Die Pelletproduktion dieses Werks beträgt 25.000 Jahrestonnen. Aus dem anfallenden Presssaft werden vor Ort in einer Biogasanlage Strom und Wärme erzeugt, der verbleibende Gärrest wird als Dünger eingesetzt (Gutschrift: Mineraldünger). Während der erzeugte Strom aus ökonomischen Gründen ins Netz eingespeist und nach EEG vergütet wird (Gutschrift: Marginaler Strommix, bestehend aus 50 % Steinkohle und 50 % Erdgas), wird die erzeugte Wärme im Bandtrockner genutzt, dessen thermischer Energiebedarf dadurch zu etwa 10 % gedeckt werden kann. Die restliche Wärme (ca. 90 %) wird aus Braunkohle gewonnen.

Die Pellets werden zu einer zentralen 500 MW-BtL-Anlage transportiert, die bei einem Pelletinput von 1 Mio. Tonnen damit von 40 dezentralen Pelletwerken versorgt werden muss. Dort wird aus den Pellets Synthesegas (eine Mischung aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff) produziert, welches gereinigt und anschließend mittels Fischer Tropsch-Synthese (FT) zu BtL-Diesel umgewandelt wird, welcher fossilen Dieselkraftstoff ersetzt. Die dabei anfallenden Kuppelprodukte werden entweder deponiert (Bettasche) oder ersetzen nutzenäquivalente Produkte fossilen Ursprungs, wofür sie eine entsprechende Gutschrift erhalten.

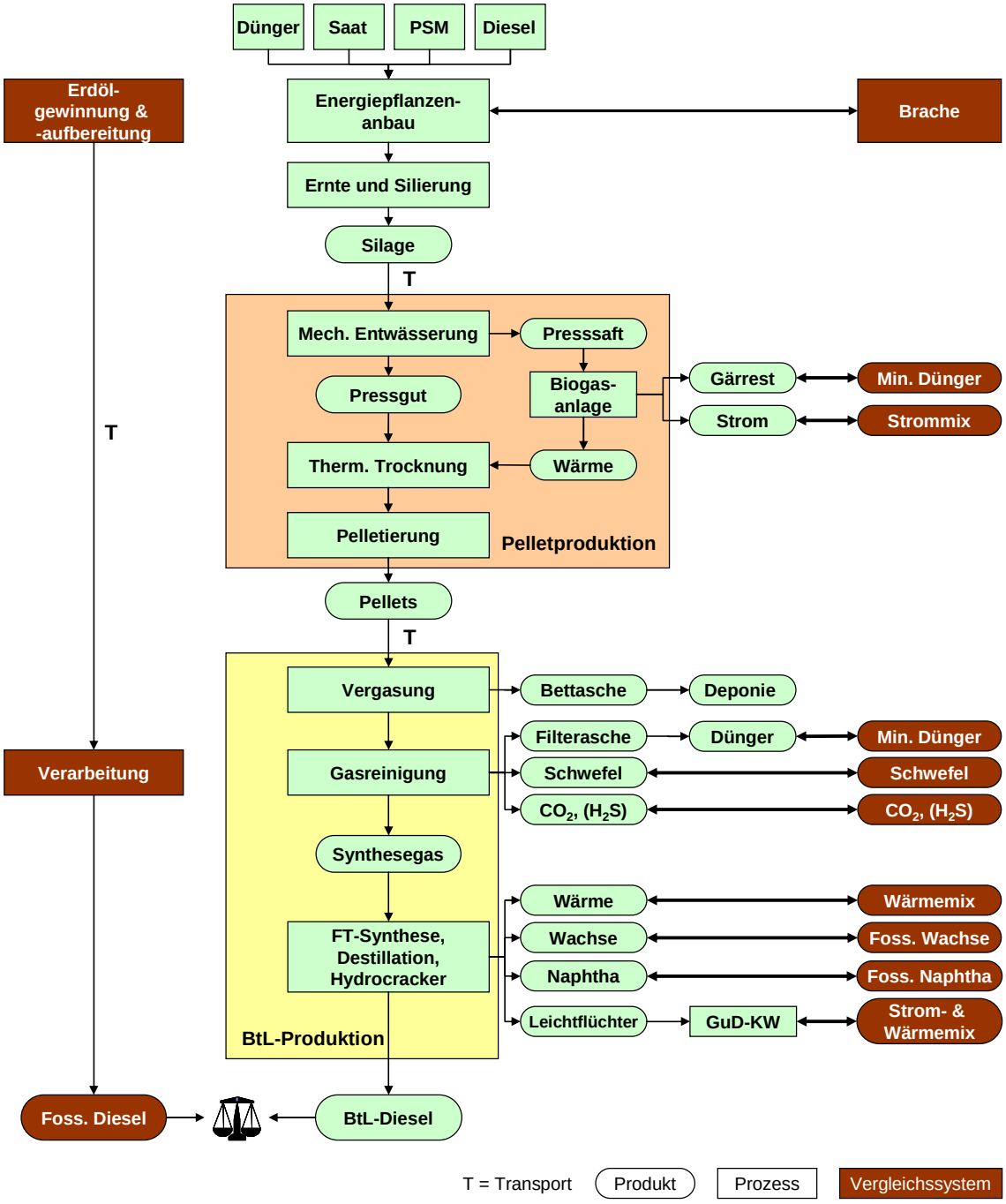


Abb. IV.3.1-1: Lebenswegvergleich zwischen fossilem Dieselkraftstoff und BtL-Diesel, der nach dem BioLog-Konzept hergestellt wird.

V.3.2 Lebensweg 2: Strom- und Wärmegewinnung (KWK-Pfad)

Die Lebenswege 1 und 2 sind bis einschließlich der Pelletproduktion identisch, Unterschiede treten erst bei der Pelletnutzung auf (siehe **Abb. V.3.2.-1**). Im Lebensweg 2 werden die Pellets in einem 50 MW-Heizkraftwerk thermisch verwertet, um Strom und Wärme zu erzeugen. Diese ersetzen einen marginalen Strommix (bestehend aus 50 % Steinkohle und 50 % Erdgas) bzw. einen marginalen Wärmemix (bestehend aus 50 % Heizöl und 50 % Erdgas), wobei im Basisfall unterstellt wird, dass lediglich 50 % der Wärme genutzt werden können. Dies hängt damit

zusammen, dass in der Nähe von Heizkraftwerken oftmals weder genügend Wärmeabnehmer wie Industriegebiete noch (Fern-)Wärmenetze zur Verfügung stehen. Die bei der Verbrennung anfallenden Kuppelprodukte Schlacke und Staub / Adsorbat werden deponiert.

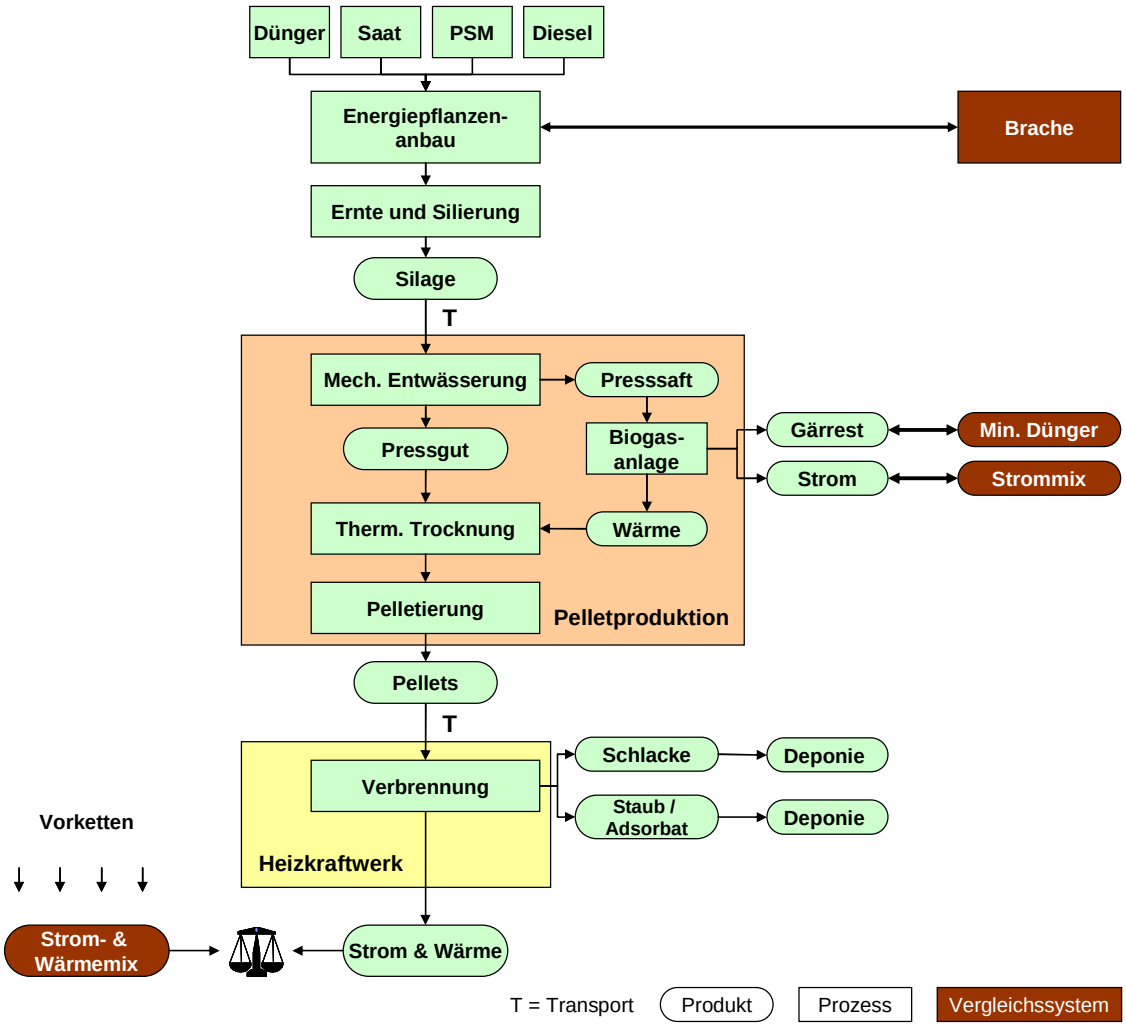


Abb. V.3.2.-1: Lebenswegvergleich zwischen herkömmlich gewonnener Energie und Strom & Wärme, die nach dem BioLog-Konzept gewonnen wird.

V.3.3 Varianten und Optimierungsmöglichkeiten

Wie bereits erwähnt, beziehen sich die Basis-Lebenswege 1 und 2 nicht nur auf die darin festgelegten Stoff- und Energieströme, sondern auch auf bestimmte Pelletwerkgrößen, Entwässerungs- und Trocknungstechnologien, verwendete Energieträger und Wirkungsgrade. Auf dieser Grundlage werden im Folgenden Varianten und Optimierungsmöglichkeiten vorgestellt, von denen sich einige auf die Pelletproduktion (Abschnitt V.3.3.1) beziehen (und damit für beide Lebenswege gleichermaßen gelten), andere dagegen nur auf die jeweilige Pelletnutzung (Abschnitt V.3.3.2).

V.3.3.1 Pelletproduktion: Varianten und Optimierungsmöglichkeiten

In den Lebenswegen 1 und 2 wird die Biomasse zunächst siliert und anschließend in einem dezentralen Pelletwerk mit 25.000 Tonnen Jahresproduktion entwässert, getrocknet und pelletiert. Im Folgenden werden einige Varianten- und Sensitivitätsanalysen sowie Optimierungsmöglichkeiten präsentiert.

a.) Variante: Elektroporation statt Silierung (ehemaliger Lebensweg 4)

Der Zellaufschluss, der im Lebensweg 1 durch Silierung erreicht wird, könnte stattdessen auch mittels Elektroporation erfolgen (siehe **Abb. V.3.3.1-1**). Allerdings würde das Umgehen der Silierung (und damit auch der Konservierung) große logistische und ökonomische Herausforderungen mit sich bringen, da sämtliche Biomasse in einem kurzen Zeitfenster nach der Ernte mit entsprechend hoher Anlagenkapazität verarbeitet werden müsste. Die restliche Zeit über würde das Pelletwerk dann stillstehen.

Bei der Elektroporation wird Zellgewebe einem elektrischen Feld ausgesetzt. Durch das Anlegen einer elektrischen Spannung findet eine irreversible Porenbildung in der Zellmembran statt, wodurch sich die Abpressbarkeit des elektroporierten Pflanzenmaterials erhöhen könnte. Infolgedessen könnte bei der mechanischen Entwässerung idealerweise mehr Saft abgepresst und damit der Energieaufwand für die thermische Trocknung des Pressguts verringert werden. Die frische Biomasse muss sich bei der Elektroporation in einer wässrigen Suspension befinden. Dazu wird sie leicht angepresst, bis sie im eigenen Saft steht (/FZK 2008/). Die elektrische Energie für die Elektroporation wird durch Netzstrom bereitgestellt.

Die Elektroporation ist ein noch sehr junges Verfahren, das bislang nur bei der Zuckerherstellung großtechnisch eingesetzt wird. Im Rahmen des BioLog-Projekts wurden erstmals Gras, Roggen und Mais elektroporiert, allerdings nur im Labor- bzw. Technikumsmaßstab. Leider konnte das elektroporierte Pflanzenmaterial aufgrund der späten Fertigstellung der mobilen Elektroporationsanlage (KEA-MOBIL) zwar einmalig mittels Schneckenpresse entwässert aber weder mittels Bandtrockner getrocknet noch pelletiert werden, so dass keine Vergleichbarkeit zu den Daten für siliertes Material gegeben war. In dieser Variantenanalyse wurde daher angesetzt, dass sich siliertes und elektroporiertes Material bei den Verarbeitungsschritten Trocknung und Pelletierung identisch verhalten. Dies wäre aber durch entsprechende Untersuchungen noch zu verifizieren. Anstelle des Dieselkraftstoff- und Folienbedarfs für die Silierung und des Energiebedarfs für die Entwässerung wurde hier der Energiebedarf für die Elektroporation und die Entwässerung zugrunde gelegt.

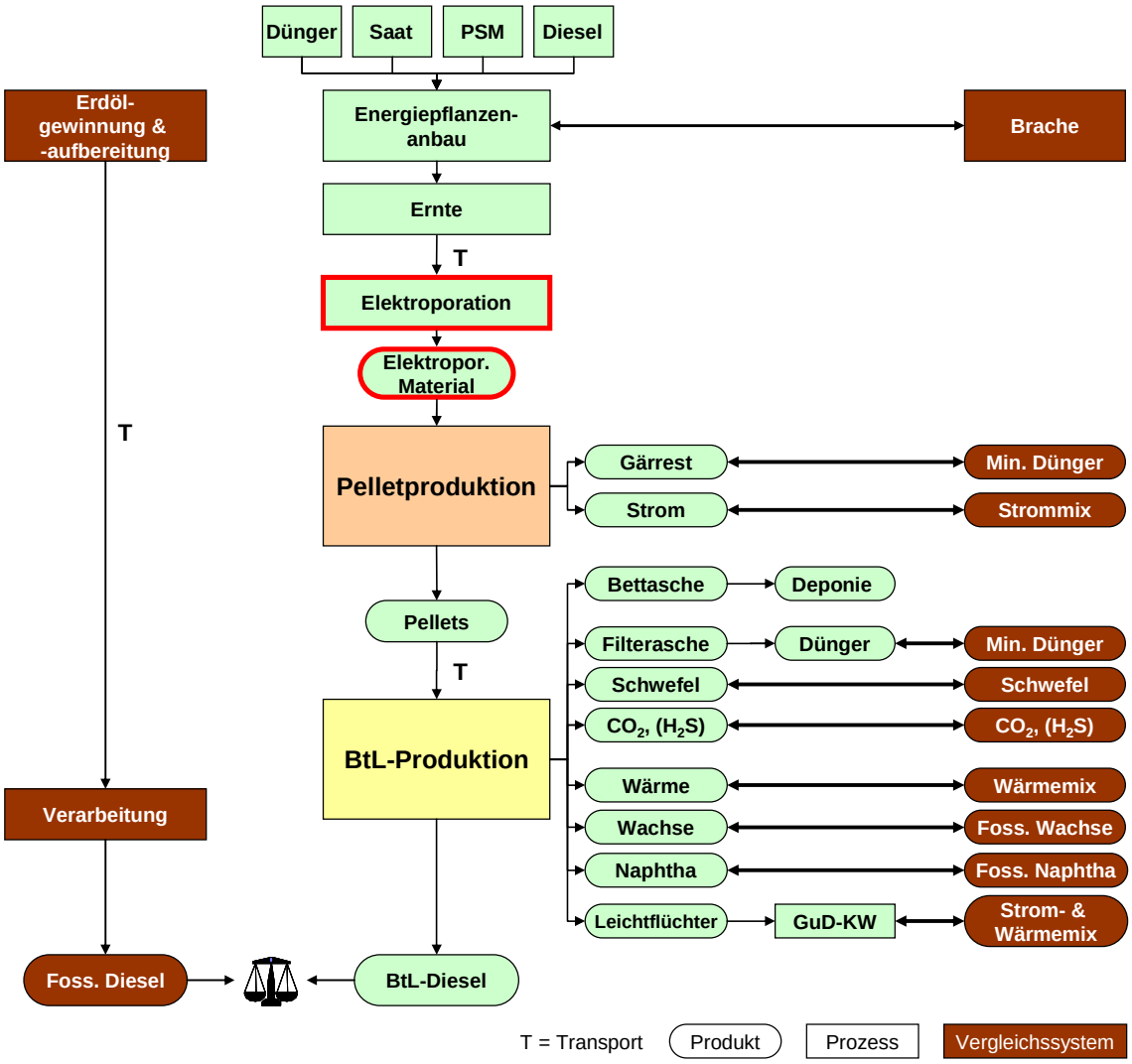


Abb. V.3.3.1-1: Lebenswegvergleich zwischen fossilem Dieselkraftstoff und BtL-Diesel, der nach dem BioLog-Konzept unter Einbeziehung der Elektroporation (rot) hergestellt wird.

b.) Sensitivitätsanalyse: Pelletwerkgröße

Das BioLog-Konzept sieht vor, dass die Silage zu einem dezentralen Pelletwerk transportiert wird, wo sie entwässert, getrocknet und pelletiert wird. Die Größe eines solchen Werks hängt im Wesentlichen davon ab, wie viel Biomasse in seinem Einzugsgebiet unter Einhaltung ökonomischer (maximale Transportentfernung = 15 km) und pflanzenbaulicher Kriterien erzeugt werden kann. Zu letzteren zählen u. a. der Anteil der Getreidefläche und der Anteil nachwachsender Rohstoffe an der Ackerfläche, der Maisanteil in der Fruchtfolge sowie der Anteil energetisch genutzten Grases an der Grünlandfläche (/TLL 2008/). Die TLL analysierte diese Zusammenhänge anhand einer Modellregion in Niedersachsen und empfiehlt, drei Werksgrößen mit einer jährlichen Pelletproduktion von 12.500, 25.000 und 50.000 Tonnen zu untersuchen. Je nach Pelletwerkgröße kommen dabei z. B. unterschiedliche Pressentypen zum Einsatz, so dass sich der spezifische Energieaufwand unterscheidet /Anhydro 2008/.

Bei einem konstanten Pelletbedarf der zentralen 500 MW-BtL-Anlage von 1 Mio. Tonnen wird die Anzahl der benötigten dezentralen Pelletwerke von ihrer Größe bestimmt. Diese Anzahl wiederum beeinflusst die Transportentfernung zwischen Pelletwerk und zentraler BtL-Anlage (/IFEU 2009/), was in dieser Sensitivitätsanalyse ebenfalls berücksichtigt wurde.

c.) Optimierung der Trocknung durch Wahl des Energieträgers

In den Basis-Lebenswegen 1 und 2 wird Braunkohle als Energieträger für die thermische Trocknung eingesetzt. In dieser Sensitivitätsanalyse werden die Auswirkungen des Einsatzes von Erdgas oder Heizöl als Energieträger untersucht.

d.) Optimierung der Entwässerungs- und Trocknungstechnologien

Der Energieaufwand für die thermische Trocknung feuchter Biomasse ist äußerst hoch. Daher werden drei Szenarien betrachtet, wie dieser Energieaufwand deutlich verringert werden könnte. Die beschriebenen Technologien wären kurzfristig (2010) verfügbar.

- ***Kombination von Hoch- und Niedertemperaturtrockner**:* Das Pressgut wird in einem Hochtemperaturtrockner auf eine Feuchte von 18 – 22 % vorgetrocknet und dann mit einem Niedertemperaturtrockner bis zur Endfeuchte nachgetrocknet. Verglichen mit dem Basisfall können dadurch 45 % an thermischer Energie eingespart werden, während sich der elektrische Energiebedarf um 10 % erhöht /Sternowsky 2008/.
- ***Wärmepumpe**:* Durch den Einsatz einer Wärmepumpe lässt sich der Energieaufwand für die Trocknung gegenüber dem Basisfall um 2/3 reduzieren, allerdings muss die Energie in Form von elektrischer Energie (Netzstrom) bereitgestellt werden /Sternowsky 2008/.
- ***Entwässerung auf 50 % TM-Gehalt**:* Die Silage wird bei gleichem elektrischen Energiebedarf und gleichem TM-Verlust auf einen TM-Gehalt von 50 % (Basisfall: 45 %) entwässert /Rinder 2008/. Dadurch reduziert sich der thermische Energieaufwand bei der Trocknung um 30 % und der elektrische Energieaufwand um 20 % gegenüber dem Basisfall /Sternowsky 2008/. Daneben fällt deutlich mehr Presssaft an.

V.3.3.2 Pelletnutzung: Optimierungsmöglichkeiten

Sowohl bei der Verarbeitung der Pellets zu BtL-Diesel als auch bei der Kraft-Wärme-Kopplung können Parameter optimiert werden, wie im Folgenden gezeigt wird.

a.) BtL: Optimierter Wirkungsgrad im Jahr 2020

Im Jahr 2020 werden deutlich verbesserte Wirkungsgrade für BtL-Anlage erwartet. Hierzu wird ein um etwa 50 % höherer Output angesetzt, sowohl an BtL-Diesel als auch an den Kuppelprodukten Naphtha und Wachse /Vodegel 2008/.

b.) KWK: Optimierte Wärmenutzung

Wie bereits erwähnt, werden im Basis-Lebensweg 2 nur 50 % der im Heizkraftwerk gewonnenen Wärme genutzt. Bei entsprechender Wärmeabnahme durch Industriegebiete oder (Fern-)Wärmenetze, können aber bis zu 80 % der Wärme genutzt werden /IFEU 2009/. Dies wird hier exemplarisch untersucht.

V.4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Übersichtsökobilanzen für die BioLog-Lebenswege präsentiert. Zunächst werden die Ergebnisse für die BioLog-Bioenergieträger im Vergleich zu fossilen Energieträgern – einschließlich Sensitivitäts- und Variantenanalysen – vorgestellt (Kapitel V.4.1–V.4.2), danach Optimierungspotenziale aufgezeigt (Kapitel V.4.3–V.4.5) und abschließend ein Vergleich zu alternativen Bioenergieträgern vorgenommen (Kapitel V.4.6).

V.4.1 BioLog-Bioenergieträger versus fossile Energieträger

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Übersichtsökobilanzen für die beiden in den Kapiteln V.3.1 und V.3.2 beschriebenen Basis-Lebenswege 1 und 2 gezeigt. Zunächst wird am Beispiel der Umweltwirkung *Treibhauseffekt* das Zustandekommen der Ergebnissalden detailliert erläutert. Anschließend werden die Gesamtergebnisse in Form von Salden für weitere ausgewählte Umweltwirkungen präsentiert.

V.4.1.1 Ergebnisse der Übersichtsökobilanzen: Beispiel Treibhauseffekt

Abb. V.4.1.1-1 zeigt für die Umweltwirkung *Treibhauseffekt* die Vor- und Nachteile von BtL-Diesel aus BioLog-Pellets gegenüber fossilem Dieselkraftstoff bzw. Bioenergie gegenüber Strom und Wärme aus fossilen Quellen. Die Ergebnisse für weitere ausgewählte Umweltwirkungen finden sich im Anhang (**Abb. V.10.1-1** – **Abb. V.10.2-2**).

Der Aufbau der gestaffelten Balken folgt immer dem gleichen Muster: Im 1. und 3. Balken sind rechts des Ursprungs die Aufwendungen (hier: Emissionen) dargestellt, die entlang des jeweiligen Lebenswegs anfallen, links des Ursprungs sind die Gutschriften (hier: Vermiedene Emissionen) aufgetragen, die durch Nutzung der Kuppelprodukte zustande kommen. Der 2. und 4. Balken zeigen die Aufwendungen für das jeweilige Äquivalenzprodukt (fossiler Dieselkraftstoff bzw. Strom und Wärme aus fossilen Quellen). Die darunter abgebildeten Ergebnissalden (5. und 6. Balken) sind die Differenz zwischen biogenem und fossilem Produkt und damit das Gesamtergebnis für den jeweiligen Lebenswegvergleich. Sie geben an, wie viele CO_2-Äquivalente pro Hektar und Jahr vermieden bzw. zusätzlich emittiert werden.

Ergebnisse

- Die Produktion und Nutzung von BtL-Diesel aus BioLog-Pellets führt zu einer negativen Treibhausgasbilanz. Nutzt man ihn anstelle von fossilem Dieselkraftstoff, werden zusätzlich 6,8 t CO_2-Äquivalente pro Hektar und Jahr emittiert. Werden die BioLog-Pellets dagegen in einer KWK-Anlage eingesetzt und dadurch Strom und Wärme aus fossilen Quellen ersetzt, können 0,9 t CO_2-Äquivalente pro Hektar und Jahr vermieden werden.
- Verantwortlich für die hohen Treibhausgasemissionen ist neben dem Energiepflanzenanbau mit einem Anteil von ca. 25 % in erster Linie die Trocknung der Silage, die durch den Einsatz fossiler Energieträger knapp zwei Drittel der Emissionen (ca. 65 %) verursacht. Silierung, Entwässerung und Transporte spielen dagegen eine untergeordnete Rolle.
- Die Gutschriften werden vor allem durch die Presssaftvergärung (Gärrest und Strom) und die Kuppelprodukte aus der Fischer-Tropsch-Synthese (Naphtha und Wachse) bestimmt.

- Der Einfluss der thermischen Trocknung ist bei anderen Umweltwirkungen (außer Energie) weniger stark ausgeprägt (siehe **Abb. V.10.1-1** – **Abb. V.10.2-2** im Anhang). Beispielsweise wird ein Großteil der versauernden Emissionen vom Anbau und der KWK-Anlage verursacht.

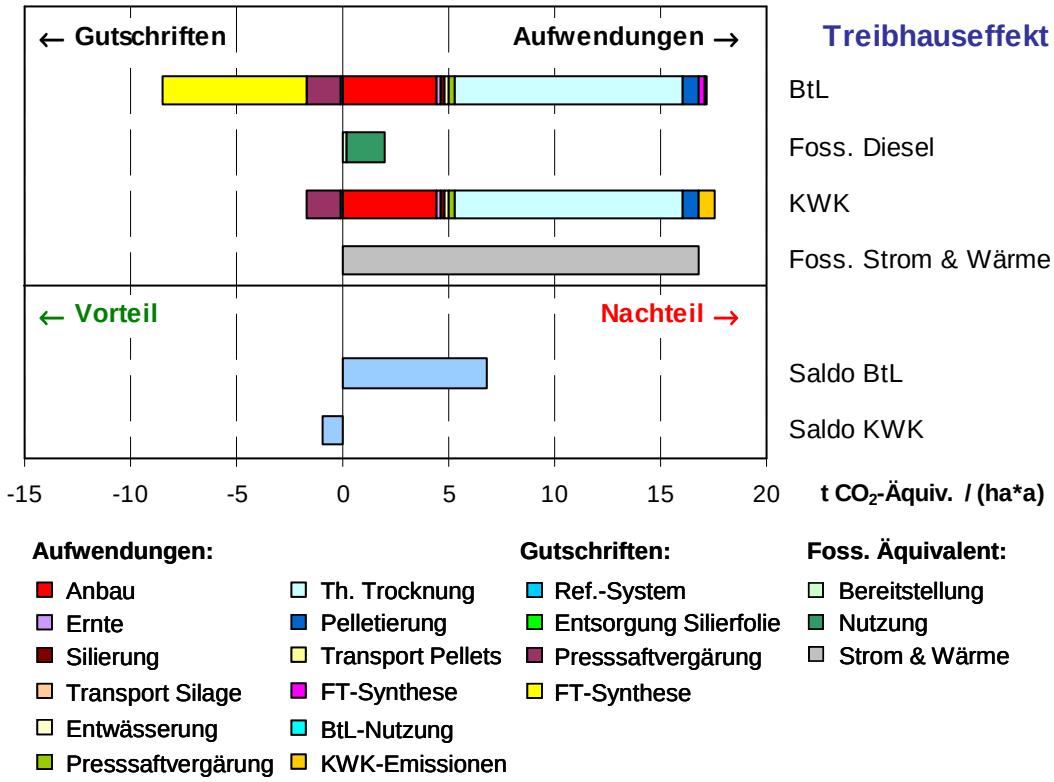


Abb. V.4.1.1-1: Detaillierte Ergebnisse des Lebenswegvergleichs a) von BtL-Diesel mit fossilem Dieselkraftstoff und b) von Bioenergie mit Strom und Wärme aus fossilen Quellen für die Umweltwirkung Treibhauseffekt

Lesebeispiel für den Balken „BtL“ für Treibhauseffekt:

Bei der Produktion und Nutzung von BtL-Diesel aus BioLog-Pellets werden einerseits ca. 17,1 t CO_2-Äquivalente pro Hektar und Jahr emittiert, andererseits ca. 8,4 t CO_2-Äquivalente pro Hektar und Jahr durch die Nutzung der Kuppelprodukte vermieden. Die Emissionen für die Produktion und Nutzung von fossilem Dieselkraftstoff betragen etwa 1,9 t CO_2-Äquivalente pro Hektar und Jahr. Im Saldo ergeben sich so durch die Nutzung von BtL-Diesel aus BioLog-Pellets anstelle von fossilem Dieselkraftstoff zusätzliche Treibhausgasemissionen von 6,8 t CO_2-Äquivalenten pro Hektar und Jahr.

Fazit

Die Trocknung der Silage hat einen enormen Einfluss auf die Ergebnisse der Treibhausgasbilanzen. Unter heutigen Produktionsbedingungen führt sie dazu, dass BtL-Diesel aus BioLog-Pellets den Treibhauseffekt sogar verstärkt, während die Pelletnutzung zur Strom- und Wärmegewinnung gerade noch zu einer geringfügig positiven Bilanz führt.

V.4.1.2 BioLog-Kraft- und Brennstoffe im Vergleich: BtL versus KWK

Abb. V.4.1.2-1 zeigt die Vor- und Nachteile von BtL-Diesel aus BioLog-Pellets gegenüber fossilem Dieselkraftstoff (BtL-Pfad) und von Bioenergie gegenüber Strom und Wärme aus fossilen Quellen (KWK-Pfad) für die Umweltwirkungen Energie, Treibhauseffekt, Nährstoffeintrag, Versauerung, Fotosmog und Lachgas (Näheres dazu siehe Kapitel V.2).

Die grafische Ergebnisdarstellung erfolgt dabei in Form von Salden, die auf die in Abschnitt V.4.1.1 beschriebene Weise ermittelt wurden. Der zweite blaue Balken in **Abb. V.4.1.2-1**, der die zusätzlichen Treibhausgasemissionen für BtL-Diesel aus BioLog-Pellets zeigt, ist daher mit dem ersten Ergebnissaldo aus **Abb. V.4.1.1-1** (Saldo BtL) identisch.

Ergebnisse

- **Lebensweg 1 (BtL-Pfad)**
  - Energie und Treibhauseffekt: Die Energie- und Treibhausgasbilanzen für den BtL-Pfad fallen negativ aus, was insbesondere auf die hohen Aufwendungen bzw. Emissionen beim Energiepflanzenanbau und der Trocknung der Silage zurückzuführen ist.
  - Weitere Umweltwirkungen: Für das ungünstige Ergebnis bei Versauerung, Nährstoffeintrag und Lachgas sind in erster Linie die Emissionen aus dem Energiepflanzenanbau verantwortlich, gefolgt von denen aus der Trocknung, der Presssaftvergärung und der BtL-Nutzung (siehe **Abb. V.10.1-1** – **Abb. V.10.1-2** im Anhang).
- **Lebensweg 2 (KWK-Pfad)**
  - Energie und Treibhauseffekt: Die Energiebilanz für den KWK-Pfad fällt sehr positiv aus. Die Treibhausgasbilanz dagegen ist nur deshalb nicht negativ, weil äußerst energie- und treibhausgaslastig gewonnener Strom und Wärme aus fossilen Quellen ersetzt werden.
  - Weitere Umweltwirkungen: Auch hier kommt es bei Versauerung, Nährstoffeintrag und Lachgas zu Mehremissionen gegenüber konventioneller Strom- und Wärmegewinnung, was zum Teil auf die Emissionen aus dem Energiepflanzenanbau, vor allem aber auf die Emissionen des Heizkraftwerks zurückzuführen ist (siehe **Abb. V.10.2-** – **Abb. V.10.2-2** im Anhang). Daher schneidet der KWK-Pfad hier deutlich schlechter ab als der BtL-Pfad.
- **Trend**: Während die Energie- und Treibhausgasbilanzen für die beiden Pfade qualitativ unterschiedlich ausfallen (Vorteile für KWK, Nachteile für BtL), treten bei den Umweltwirkungen Versauerung, Nährstoffeintrag und Lachgas stets Mehremissionen (Nachteile) auf. Da die Ergebnisse für alle betrachteten Pfade und Varianten diesem Trend

folgen, wird in den kommenden Ergebnisgrafiken nur eine der drei Umweltwirkungen abgebildet (Versauerung), die beiden anderen (Nährstoffeintrag und Lachgas) aber mit diskutiert.

- **Ausnahme**: Wie in **Tab. V.2-1** näher beschrieben, gibt es zwei Wirkungsindikatoren zur Beschreibung der Umweltwirkung Fotosmog: POCP und NcPOCP. Während für den KWK-Pfad beide Fotosmog-Ergebnisse auf eine Verstärkung der Fotooxidantienbildung hinweisen, tritt beim BtL-Pfad der Fall auf, dass das POCP-Ergebnis leicht günstig, das NcPOCP-Ergebnis dagegen deutlich ungünstig ausfällt. Aufgrund dieser Gegenläufigkeit wird im Folgenden auf die Darstellung dieser Umweltwirkung verzichtet.

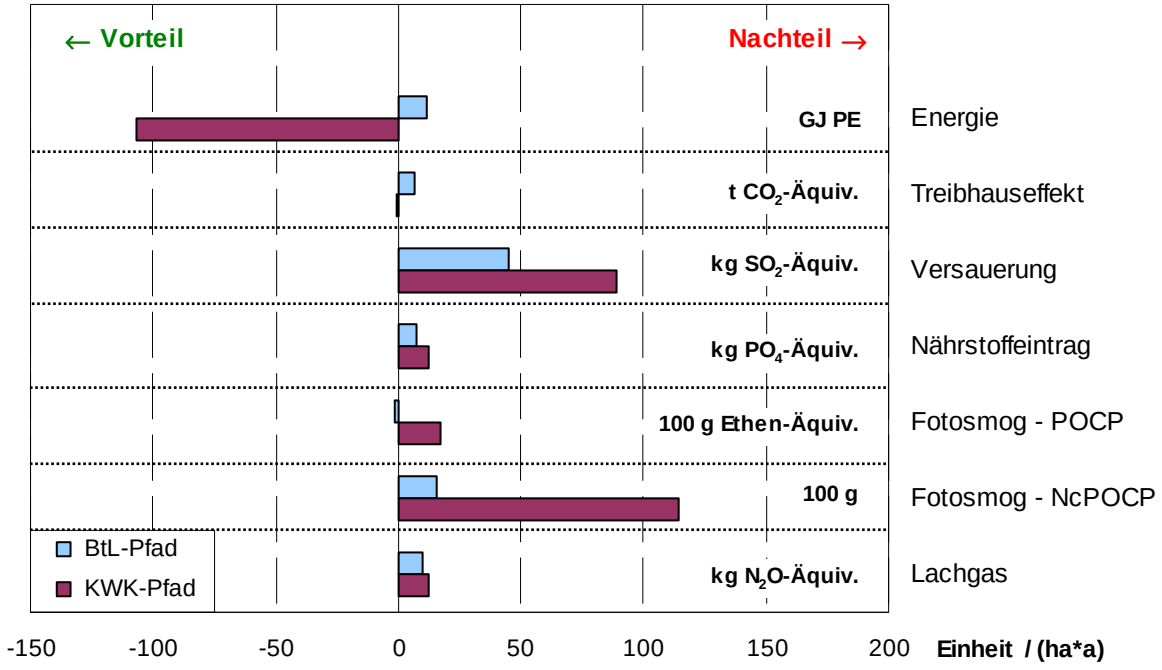


Abb. V.4.1.2-1: Umweltwirkungen a) von BtL-Diesel im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff (BtL-Pfad) und b) von Bioenergie im Vergleich zu Strom und Wärme aus fossilen Quellen (KWK-Pfad); PE = Primärenergie

Lesebeispiel für den dritten blauen Balken „Versauerung“ für BtL:

Wird BtL-Diesel aus BioLog-Pellets produziert und statt fossilem Dieselkraftstoff genutzt, ergeben sich Mehremissionen von ca. 45 kg SO_2-Äquivalenten pro Hektar und Jahr.

Fazit

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Verwendung von BioLog-Pellets zur Strom- und Wärmegewinnung in einer KWK-Anlage zu ökologischen Vor- und Nachteilen führt. Die Ergebnisse folgen damit einem Muster, das bereits für viele Biokraftstoffe und -brennstoffe bekannt ist.

Auf Grundlage der Resultate für die einzelnen Umweltwirkungen kann jedoch keine objektive, wissenschaftlich begründete Entscheidung für oder gegen diesen Pfad getroffen werden. Erst wenn zusätzliche Kriterien herangezogen bzw. subjektive Bewertungsverfahren angewandt

werden, lässt sich eine zusammenfassende ökologische Bewertung vornehmen. In Deutschland geschieht dies üblicherweise verbal-argumentativ auf Basis der ökologischen Priorität /UBA 1999/. Diese misst beispielsweise dem Treibhauseffekt eine sehr große ökologische Priorität bei, so dass sich mit dieser Werthaltung eine Entscheidung *für* den KWK-Pfad evtl. begründen ließe. Dagegen ist mit derselben Werthaltung eine BtL-Produktion und -Nutzung unter *heutigen* Bedingungen aufgrund der nachteiligen Ergebnisse abzulehnen.

Da die Ergebnisse für die Umweltwirkungen Versauerung, Nährstoffeintrag und Lachgas qualitativ einheitlich ausfallen, wird in den folgenden Kapiteln – neben Energie und Treibhauseffekt – nur erstere dargestellt.

V.4.2 Sensitivitäts- und Variantenanalysen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der ersten beiden vorgestellten Varianten und Optimierungsmöglichkeiten präsentiert. Dabei handelt es sich um die Variante Elektroporation und eine Sensitivitätsanalyse zur Größe der dezentralen Pelletwerke.

V.4.2.1 Variante: Elektroporation statt Silierung

Wie bereits in Abschnitt V.3.3.1 beschrieben, könnte der Zellaufschluss, welcher im Lebensweg 1 durch Silierung erreicht wird, auch mittels Elektroporation erfolgen. **Abb. V.4.2.1-1** zeigt die Vor- und Nachteile von BtL-Diesel aus BioLog-Pellets gegenüber fossilem Dieselkraftstoff bei Zellaufschluss durch Silierung (Lebensweg 1) bzw. Elektroporation (ehem. Lebensweg 4) für ausgewählte Umweltwirkungen.

Ergebnisse

- Wird die frische Biomasse elektroporiert statt siliert, so fallen die Bilanzergebnisse für Energie, Treibhauseffekt, Versauerung, Nährstoffeintrag und Lachgas (letztere beide nicht abgebildet) zwar qualitativ ähnlich, aber quantitativ etwas ungünstiger aus.
- Dies ist darauf zurückzuführen, dass für die Elektroporation Strom eingesetzt wird, dessen Bereitstellung höhere spezifische Aufwendungen bzw. Emissionen mit sich bringt als die Bereitstellung von Dieselkraftstoff und die Produktion der Silierfolie. Zudem ergibt sich für die thermische Verwertung der Silierfolie nach Gebrauch eine Gutschrift, welche die Aufwendungen bzw. Emissionen der Produktion bereits wieder zur Hälfte kompensiert.

Fazit

Das noch sehr junge Verfahren der Elektroporation wurde im Rahmen des BioLog-Projekts erstmals an frisch geerntetem Gras, Roggen und Mais getestet. Da die Untersuchungen nur im Labor- bzw. Technikumsmaßstab durchgeführt wurden und das elektroporierte Material weder mittels Bandtrockner getrocknet noch pelletiert wurde, musste in dieser Variantenanalyse angesetzt werden, dass sich siliertes und elektroporiertes Material bei den Verarbeitungsschritten Trocknung und Pelletierung identisch verhalten – was noch zu verifizieren wäre. Unter diesen Randbedingungen schneidet die Elektroporation ungünstiger ab als die Silierung.

Neben den ökologischen Nachteilen würde das Umgehen der Silierung große ökonomische und logistische Herausforderungen mit sich bringen, da sämtliche Biomasse aufgrund der fehlenden Konservierung in einem kurzen Zeitfenster nach der Ernte mit entsprechend hoher Anlagenkapazität verarbeitet werden müsste. Die restliche Zeit über würde das Pelletwerk dann stillstehen.

Eine ebenfalls denkbare Variante, eine Elektroporation nach der Silierung, führt zu keiner Verbesserung der Materialeigenschaften, da die Silierung die frische Biomasse bereits vollständig aufschließt /FZK 2008/. Insgesamt erweist sich die Silierung unter ökologischen, ökonomischen und logistischen Gesichtspunkten als die bessere Wahl, vor allem weil sie die frische Biomasse nebenbei auch konserviert, so dass diese ganzjährig zur Verfügung steht.

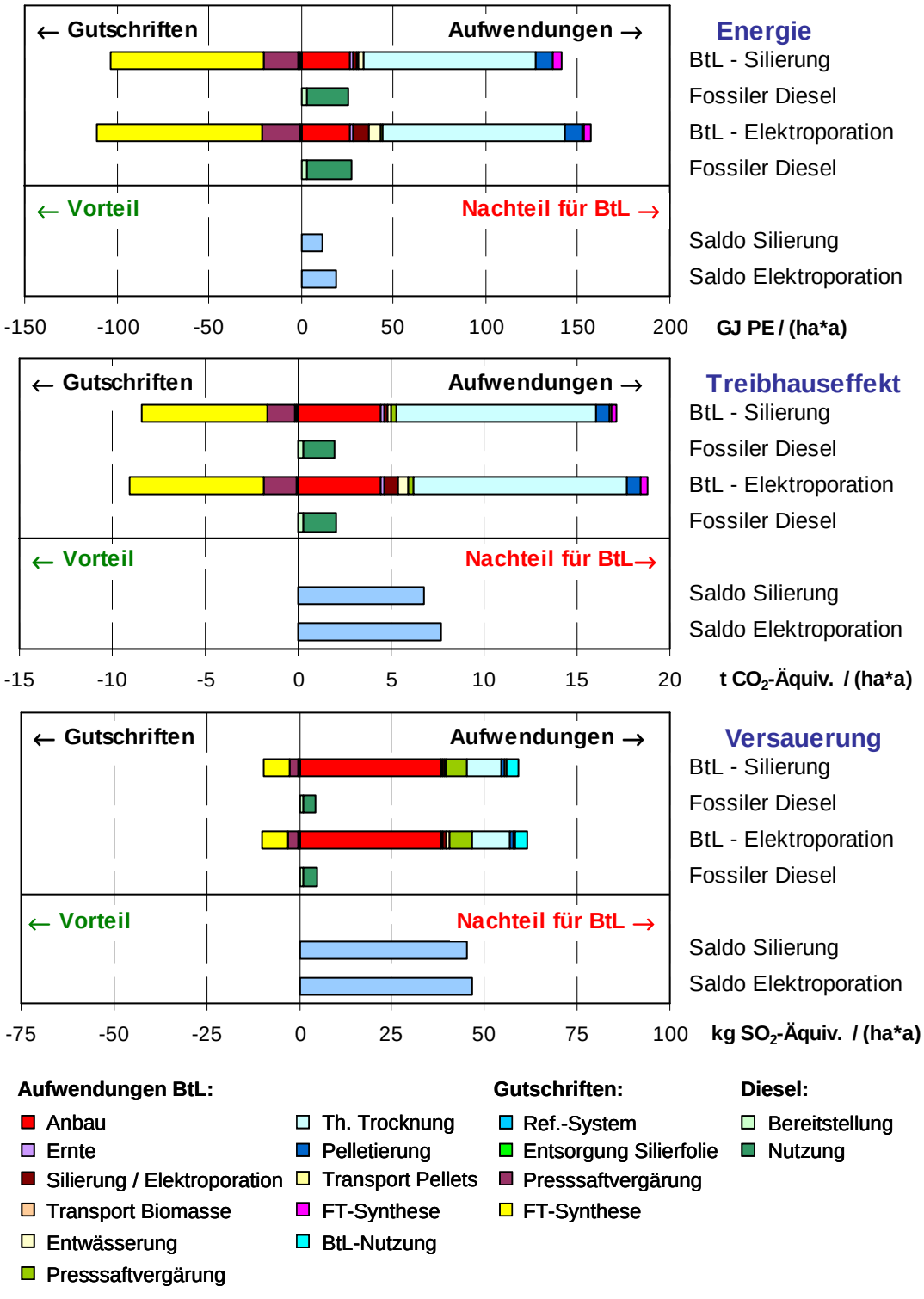


Abb. V.4.2.1-1: Umweltwirkungen von BtL-Diesel im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff bei Zellaufschluss durch Silierung bzw. Elektroporation; PE = Primärenergie

Lesebeispiel für den Balken „Saldo Elektroporation“ für Energie:

Wird BtL-Diesel aus elektroporierter Biomasse produziert und anstelle von fossilem Dieselkraftstoff genutzt, kommt es zu einem Mehrverbrauch an nicht-erneuerbaren Energieträgern in Höhe von 18,6 GJ Primärenergie.

V.4.2.2 Sensitivitätsanalyse: Größe der dezentralen Pelletwerke

Das BioLog-Konzept sieht vor, dass die Silage zu einem dezentralen Pelletwerk transportiert wird, wo sie entwässert, getrocknet und pelletiert wird. Die Größe eines solchen Pelletwerks hängt im Wesentlichen davon ab, wie viel Biomasse in ihrem Einzugsgebiet unter Einhaltung ökonomischer und pflanzenbaulicher Kriterien erzeugt werden kann (siehe Abschnitt V.3.3.1).

Innerhalb des BioLog-Projekts wurden daher drei Werksgrößen mit einer jährlichen Pelletproduktion von 12.500, 25.000 und 50.000 Tonnen untersucht, wobei für die Basis-Lebenswege 1 und 2 die mittlere Werksgröße zugrunde gelegt wurde.

Abb. V.4.2.2-1 zeigt die Vor- und Nachteile von BtL-Diesel aus BioLog-Pellets gegenüber fossilem Dieselkraftstoff in Abhängigkeit der Werksgröße für ausgewählte Umweltwirkungen.

Ergebnisse

- Obwohl sich der spezifische Energieaufwand für die mechanische Entwässerung – bedingt durch den Einsatz unterschiedlicher Pressentypen – zum Teil deutlich unterscheidet, hat die Pelletwerkgröße praktisch keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Ökobilanzen, die für alle Umweltwirkungskategorien nahezu gleich ausfallen. Dies hängt damit zusammen, dass die Aufwendungen bzw. Emissionen für diesen Lebenswegabschnitt ohnehin recht klein sind (siehe **Abb. V.4.1.1-1** bzw. **Abb. V.10.1-1** und **Abb. V.10.1-2** im Anhang), so dass selbst eine Verdoppelung des spezifischen Energiebedarfs kaum ins Gewicht fällt.
- Auch die unterschiedlichen Transportentfernungen für Silage bzw. Pellets, die sich – bei einem konstanten Pelletbedarf der zentralen 500 MW-BtL-Anlage von 1 Mio. Tonnen – aus der Pelletwerkgröße und -anzahl ergeben, haben nur einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf die Bilanzergebnisse. So erhöht sich die durchschnittliche Transportentfernung zwar für Silage von 5,5 auf 9,5 km und für die Pellets von ca. 42 auf ca. 49 km (jeweils für das 12.500- bzw. 50.000-Tonnen-Werk), was aber angesichts ohnehin recht kleiner Transportaufwendungen bzw. -emissionen kaum eine Rolle spielt (siehe **Abb. V.4.1.1-1** bzw. **Abb. V.10.1-1** und **Abb. V.10.1-2** im Anhang).

Fazit

Die Ökobilanzergebnisse weisen keine klaren Vor- oder Nachteile für eine bestimmte Pelletwerkgröße aus. Insofern kann diese aufgrund von (agrar-)ökonomischen oder logistischen Erwägungen gewählt werden.

Neben den hier untersuchten Umweltwirkungen müssen die im BioLog-Konzept vorgesehenen Konversionsanlagen im Sinne einer ökologischen Gesamtbewertung auch unter dem Aspekt der Flächeninanspruchnahme diskutiert werden. Dies betrifft sowohl das Einzugsgebiet eines einzelnen Pelletwerks als auch die gesamte Anbaufläche von 60.000 – 65.000 ha, die zur Versorgung einer 500 MW-BtL-Anlage benötigt wird und damit dauerhaft gebunden wäre. Bei einem maximal anvisierten Nawaro-Anteil von 25 % entspräche dies sogar einer Gesamtfläche von 240.000 – 260.000 ha. Am Beispiel einer Modellregion in Niedersachsen konnte zwar gezeigt werden, dass die erforderlichen Energiepflanzen unter Einhaltung ökonomischer und pflanzenbaulicher Kriterien erzeugt werden können. Inwiefern ein solch intensiver Energiepflanzenanbau aber aus Naturschutzsicht – z. B. in punkto biologische Vielfalt in der Agrarlandschaft – akzeptabel wäre, müsste noch detailliert untersucht werden.

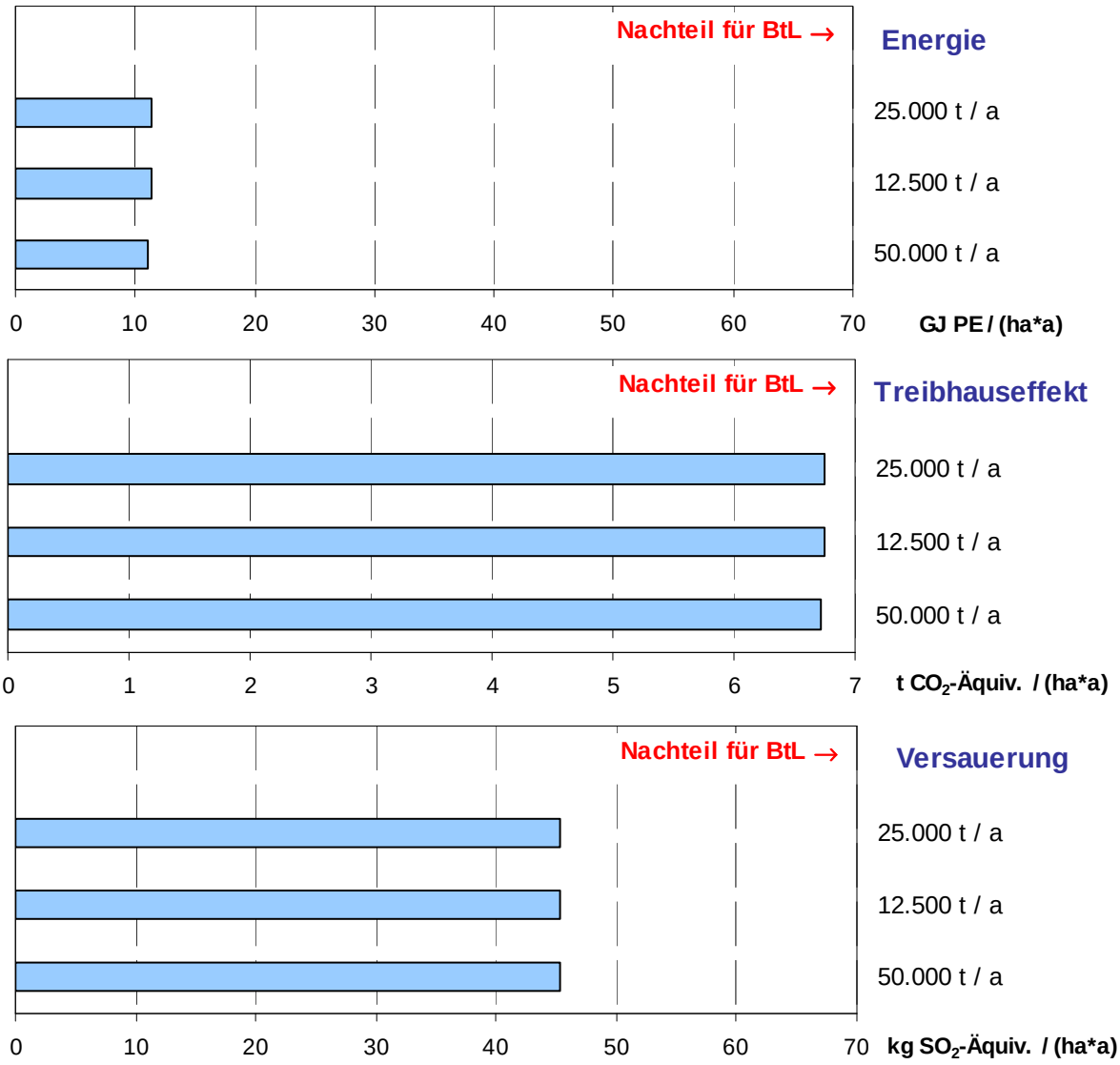


Abb. V.4.2.2-1: Umweltwirkungen von BtL-Diesel im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff in Abhängigkeit der Größe der dezentralen Pelletwerke; PE = Primärenergie

Lesebeispiel für den zweiten Balken „12.500 t / a“ für Energie:

Werden BioLog-Pellets in einem Pelletwerk mit 12.500 t Jahresoutput produziert, zu BtL-Diesel verarbeitet und anstelle von fossilem Dieselkraftstoff genutzt, so ergeben sich zusätzliche energetische Aufwendungen von ca. 11,4 GJ Primärenergie.

V.4.3 Optimierungspotenziale bei der Pelletproduktion

Wie in Kapitel V.4.1 gezeigt, ist die Trocknung der Silage bei beiden Lebenswegen für über 60 % der Treibhausgasmissionen verantwortlich. Im Projektverlauf wurden daher Szenarien entwickelt, wie dieser Energiebedarf bzw. die resultierenden Emissionen reduziert werden könnten. Im Folgenden werden die Ergebnisse der letzten beiden in Abschnitt V.3.3.1 beschriebenen Optimierungsmöglichkeiten beispielhaft für den BtL-Pfad vorgestellt.

V.4.3.1 Wahl des Energieträgers für die Trocknung

Bei den Basis-Lebenswegen 1 und 2 wurde unterstellt, dass aus ökonomischen Gründen Braunkohle als fossiler Energieträger für die thermische Trocknung der Silage eingesetzt wird. Der Energiebedarf könnte aber auch durch Einsatz von Heizöl oder Erdgas gedeckt werden. **Abb. V.4.3.1-1** zeigt die Vor- und Nachteile von BtL-Diesel aus BioLog-Pellets gegenüber fossilem Dieselkraftstoff bei Verwendung unterschiedlicher fossiler Energieträger.

Ergebnisse

- Die Ergebnisse der Energiebilanz verschlechtern sich, wenn Erdgas oder Heizöl anstelle von Braunkohle als fossile Energieträger für die Trocknung eingesetzt werden. Dies ist auf den höheren spezifischen Energieaufwand bei der Bereitstellung von Erdgas und Heizöl zurückzuführen, der im Fall von Heizöl am größten ist.
- Anders sieht es dagegen bei Treibhauseffekt, Versauerung und Nährstoffeintrag aus. Hier wirkt sich der Einsatz von Erdgas günstig aus, vor allem beim Treibhauseffekt. Gegenüber einem Einsatz von Braunkohle verbessert sich das Ergebnis der Treibhausgasbilanz um 75 %. Diese Verbesserung allein reicht allerdings noch nicht für eine positive Bilanz aus.
- Interessanterweise verlaufen die Ergebnisse für Energie damit nicht parallel zu denen für Treibhauseffekt, Versauerung, Nährstoffeintrag und Lachgas (letztere beide nicht abgebildet). Dies liegt daran, dass Braunkohle zwar mit relativ geringem Energieaufwand bereitgestellt werden kann, dann aber bei der Verbrennung relativ hohe Emissionen verursacht. Bei Erdgas sind die Verhältnisse genau umgekehrt.

Fazit

Aus Klimaschutzsicht sollte unbedingt Erdgas als Energieträger für die thermische Trocknung verwendet werden, da dadurch die Treibhausgasbilanz wesentlich verbessert wird. Zwar wirkt sich dies ungünstig auf die Energiebilanz aus, dennoch ist die Verschlechterung relativ klein im Vergleich zu der enormen Verbesserung beim Treibhauseffekt. Letztendlich führt diese Maßnahme aber noch zu keiner *qualitativen* Verbesserung der Bilanzergebnisse.

Lesebeispiel für den zweiten Balken „Heizöl“ für Treibhauseffekt:

Wird Heizöl als Energieträger zur Trocknung verwendet, anschließend BtL-Diesel aus den BioLog-Pellets produziert und statt fossilem Dieselkraftstoff genutzt, so ergeben sich zusätzliche Treibhausgasemissionen von ca. 3,7 t CO_2-Äquivalenten pro Hektar und Jahr.

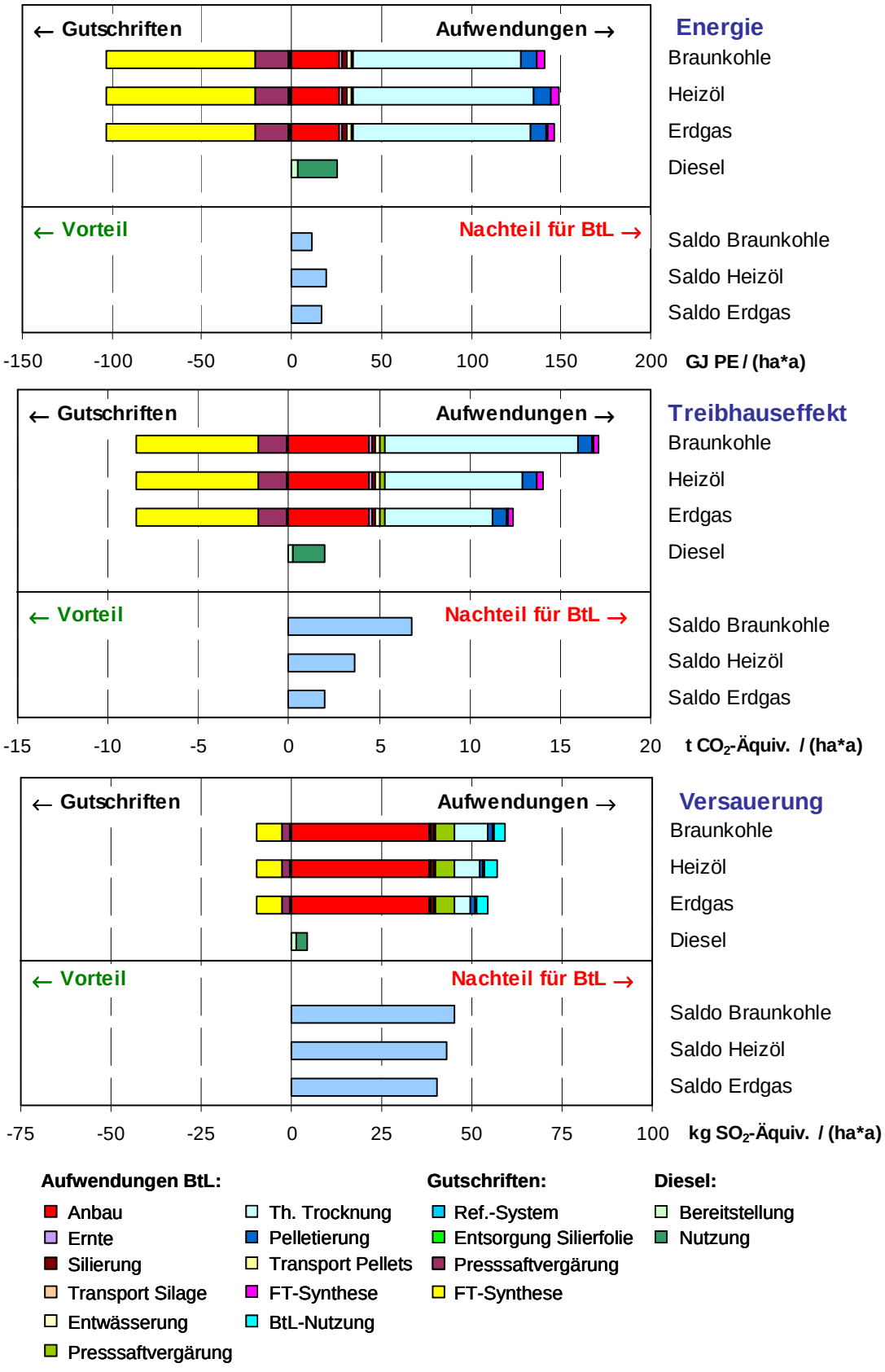


Abb. V.4.3.1-1: Umweltwirkungen von BtL-Diesel im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff in Abhängigkeit des Energieträgereinsatzes bei der Trocknung; PE = Primärenergie

V.4.3.2 Zukünftige Entwässerungs- und Trocknungstechnologien

Wie in Abschnitt V.3.3.1 bereits beschrieben, gibt es verschiedene, kurzfristig (2010) verfügbare Möglichkeiten, die mechanische Entwässerung und thermische Trocknung zu optimieren, was zu einer deutlichen Reduzierung des Energieaufwands führen würde. **Abb. V.4.3.2-1** zeigt die Vor- und Nachteile von BtL-Diesel aus BioLog-Pellets gegenüber fossilem Dieselkraftstoff für die drei untersuchten Szenarien sowie eine Verknüpfung zweier Szenarien.

Ergebnisse

- Kombination von Hoch- und Niedertemperaturtrockner (‚HT & NT'): Durch diese Kombination verringert sich der Primärenergiebedarf für die Trocknung um ca. 45 % und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen um ca. 50 %. Dadurch kommt es bei der im Basisfall (‚Heute') ungünstigen Energiebilanz zu einem Vorzeichenwechsel, d. h. es kann Energie eingespart werden. Darüber hinaus verbessert sich auch die ungünstige Treibhausgasbilanz um ca. 75 %, bleibt aber negativ.
- Wärmepumpe: Der Einsatz einer Wärmepumpe reduziert den Primärenergiebedarf für die Trocknung um ca. 35 % und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen um ca. 50 %. Dies führt ebenfalls zu einer positiven Energiebilanz, vor allem aber werden die Mehremissionen an Treibhausgasen gegenüber dem Basisfall um ca. 80 % reduziert.
- Entwässerung auf 50 % TM-Gehalt (‚Entwäss. 50 % TM'): Wird die Silage mechanisch auf einen TM-Gehalt von 50 % entwässert, können bei der Trocknung ca. 40 % Primärenergie und Treibhausgasemissionen eingespart werden. Daraus resultieren eine positive Energiebilanz und eine gegenüber dem Basisfall um ca. 70 % verbesserte Treibhausgasbilanz.
- Eine Verknüpfung der Maßnahmen 1 und 3 verringert den Primärenergiebedarf und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen gegenüber dem Basisfall um jeweils ca. 70 %. In diesem Fall kommt es selbst beim Treibhauseffekt zu einem Vorzeichenwechsel, d. h. es können netto Treibhausgasemissionen vermieden werden.
- Auf Versauerung, Nährstoffeintrag und Lachgas (letztere beide nicht abgebildet) haben diese Optimierungsmöglichkeiten allerdings nur geringfügig positive Auswirkungen, da diese Umweltwirkungen vor allem vom Energiepflanzenanbau beeinflusst werden.

Fazit

Erst durch die Verknüpfung einer Entwässerung auf 50 % TM-Gehalt mit einer innovativen Trocknerkombination (‚HT & NT') kommt es bei der Treibhausgasbilanz zu einem Vorzeichenwechsel, d. h. zu Netto-Treibhausgaseinsparungen. Insofern sollten beide Technologien mit Hochdruck weiterentwickelt und besser aufeinander abgestimmt werden. Bislang ist z. B. noch unklar, ob ein TM-Gehalt von 50 % mit einer Schneckenpresse erreichbar ist.

Lesebeispiel für den zweiten Balken „2010: HT & NT" für Energie:

Wird zur Trocknung der Silage eine Kombination aus Hoch- und Niedertemperaturtrockner verwendet, BtL-Diesel aus den Pellets produziert und anstelle von fossilem Dieselkraftstoff genutzt, so lassen sich knapp 33 GJ Primärenergie pro Hektar und Jahr einsparen.

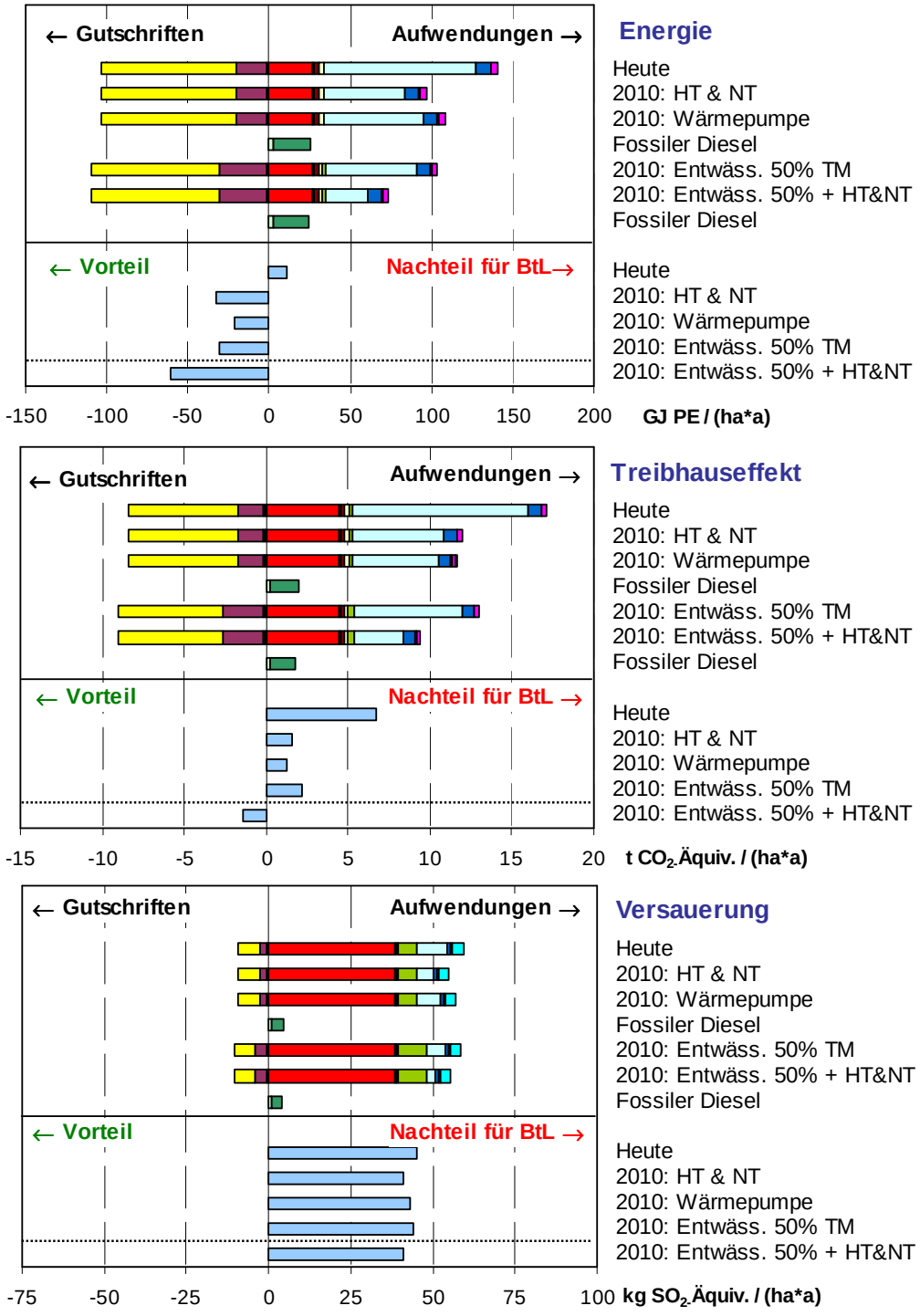


Abb. V.4.3.2-1: Umweltwirkungen von BtL-Diesel im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff in Abhängigkeit verschiedener Trocknungstechnologien; PE = Primärenergie

V.4.4 Optimierungspotenziale bei der Pelletnutzung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der in Abschnitt V.3.3.2 vorgestellten Optimierungsmöglichkeiten präsentiert. Diese betreffen zum einen den Wirkungsgrad der BtL-Anlage, welcher mittelfristig (2020) deutlich gesteigert werden kann, zum anderen die Wärmenutzung bei der KWK-Anlage. **Abb. V.4.4-1** zeigt die Vor- und Nachteile von BtL-Diesel aus BioLog-Pellets gegenüber fossilem Dieselkraftstoff (BtL-Pfad) und von Bioenergie gegenüber Strom und Wärme aus fossilen Quellen (KWK-Pfad) für ausgewählte Umweltwirkungen.

Ergebnisse

- **Lebensweg 1 (BtL-Pfad)**
  - Energie und Treibhauseffekt: Eine Wirkungsgradsteigerung, die den BtL-Output im Jahr 2020 um 50 % erhöht, wirkt sich positiv auf die Energiebilanz aus. Zwar werden dann nur in geringem Umfang nicht-erneuerbare Energieträger eingespart, aber immerhin kommt es nicht mehr wie im Basisfall (‚Heute') zu einem Mehrverbrauch. Darüber hinaus verbessert sich auch die ungünstige Treibhausgasbilanz um ca. 20 %, bleibt aber negativ.
  - Weitere Umweltwirkungen: Auf Versauerung, Nährstoffeintrag und Lachgas (letztere beide nicht abgebildet) hat ein höherer Wirkungsgrad dagegen kaum Auswirkungen, da diese Umweltwirkungen vor allem vom Energiepflanzenanbau beeinflusst werden.
- **Lebensweg 2 (KWK-Pfad)**
  - Energie und Treibhauseffekt: Kann ein größerer Anteil der KWK-Wärme genutzt werden, beispielsweise 80 % gegenüber 50 % im Basisfall, kann 50 % mehr Primärenergie eingespart und die fünffache Menge an Treibhausgasemissionen vermieden werden.
  - Weitere Umweltwirkungen: Eine höhere Wärmenutzung bei der KWK-Anlage wirkt sich auch leicht positiv auf Versauerung und Nährstoffeintrag (letztere nicht abgebildet) aus: Die Mehremissionen lassen sich dadurch um ca. 3 % reduzieren.

Fazit

Allein aus einer Wirkungsgradsteigerung bei der BtL-Produktion wird auch mittelfristig keine positive Treibhausgasbilanz resultieren, allerdings ist sie ein wichtiger Baustein. Daher sollten alle Anstrengungen unternommen werden, auch die BtL-Technologie weiter zu verbessern.

Aus Umweltschutzsicht ist es äußerst erstrebenswert, den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung in stärkerem Maße als bisher voranzutreiben und dabei gleichzeitig darauf zu achten, einen möglichst großen Anteil der erzeugten Wärme zu nutzen. Dies gilt damit auch für den Fall, dass eine KWK-Anlage basierend auf dem BioLog-Konzept umgesetzt wird. Bei der Planung einer solchen Anlage sollten daher potenzielle Wärmesenken unbedingt berücksichtigt werden, u. a. bei der Standortwahl und Dimensionierung der Anlage. Für den Fall, dass in der Nähe keine großen Wärmeabnehmer wie Industriegebiete vorhanden sind, könnten Fernwärmenetze eine Alternative darstellen.

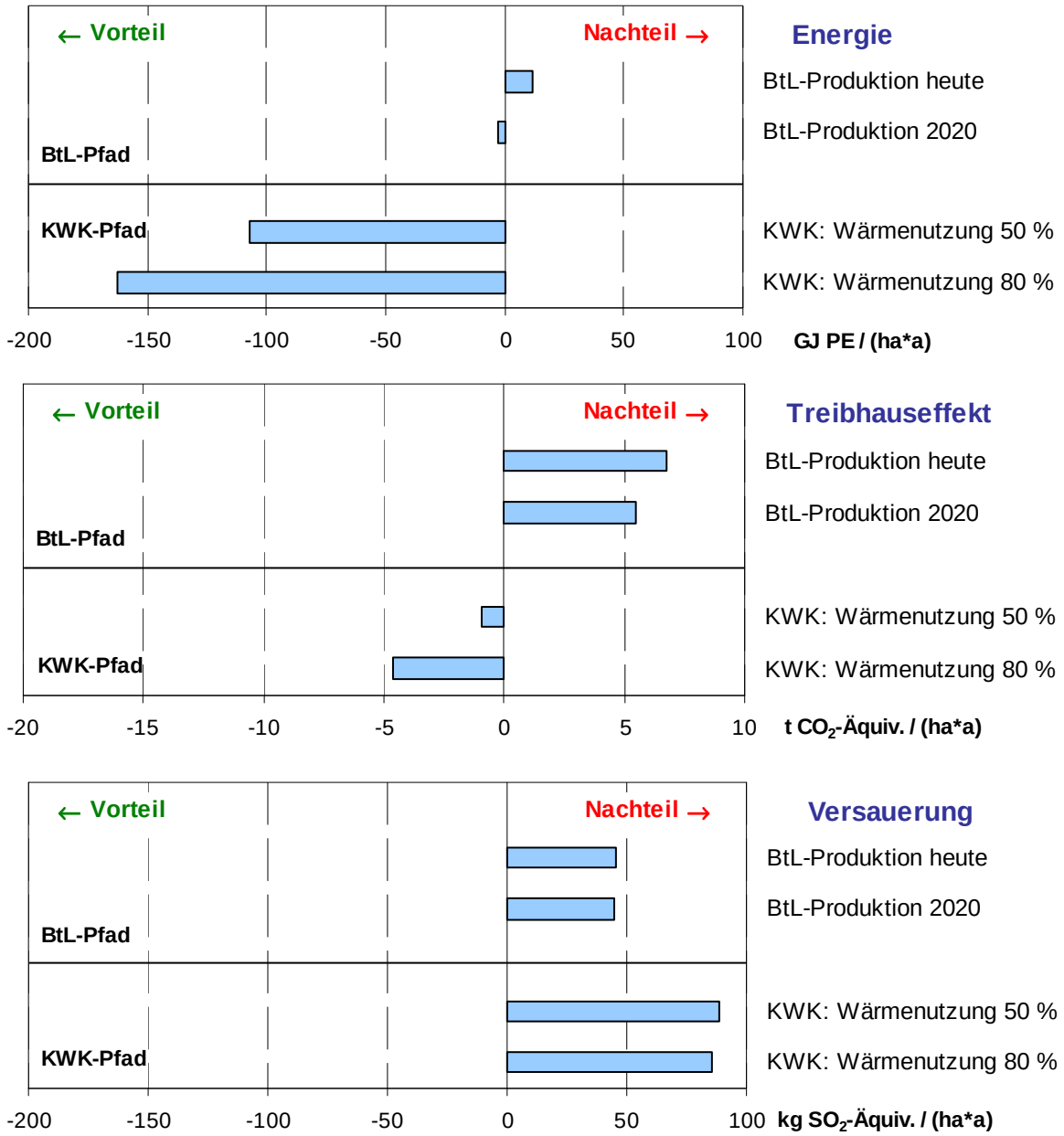


Abb. V.4.4-1: Umweltwirkungen a) von BtL-Diesel im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff (BtL-Pfad) und b) von Bioenergie im Vergleich zu Strom und Wärme aus fossilen Quellen (KWK-Pfad) in Abhängigkeit des Wirkungsgrades der BtL-Anlage und der KWK-Wärmenutzung; PE = Primärenergie

Lesebeispiel für den vierten Balken „Wärmenutzung 80 %“ für Treibhauseffekt:

Werden 80 % der Wärme beim KWK-Pfad genutzt, so lassen sich ca. 4,7 t CO_2-Äquivalente pro Hektar und Jahr einsparen.

V.4.5 Alle Optimierungspotenziale im Überblick

In den Kapiteln V.4.3 und V.4.5 wurden die Ergebnisse des Lebenswegvergleichs von BtL-Diesel mit fossilem Dieselkraftstoff und von Bioenergie mit Strom und Wärme aus fossilen Quellen in Abhängigkeit verschiedener Einzeloptimierungen präsentiert. Nachfolgend werden diese nun zu „best case"- und „worst case"-Szenarien für Heute, 2010 und 2020 verknüpft. **Abb. V.4.5.-1** zeigt die Bandbreite der Ergebnisse (Vor- und Nachteile) von BtL-Diesel aus BioLog-Pellets gegenüber fossilem Dieselkraftstoff (BtL-Pfad) und von Bioenergie gegenüber Strom und Wärme aus fossilen Quellen (KWK-Pfad) für ausgewählte Umweltwirkungen. Das linke Ende der Bandbreite stellt dabei den „best case", das rechte den „worst case" dar.

Ergebnisse

- **Lebensweg 1 (BtL-Pfad)**
  - Heute: Unter *heutigen* Produktionsbedingungen kann lediglich die Wahl des Energieträgers für die Trocknung beeinflusst werden. Die daraus resultierenden Bandbreiten sind mit Ausnahme des Treibhauseffekts aber relativ klein. Hier trägt der Einsatz von Erdgas zwar zur Verbesserung der Treibhausgasbilanz bei, die aber – wie auch die Bilanzen für Energie und Versauerung – trotzdem negativ ausfällt.
  - 2010: Zusätzlich zur Wahl eines umweltfreundlicheren Energieträgers für die Trocknung kann im Jahr 2010 auf verschiedene Optimierungsmöglichkeiten zurückgegriffen werden, um den Energieaufwand für die Trocknung deutlich zu senken. Die Verknüpfung einer Entwässerung auf 50% TM-Gehalt mit einer Kombination von Hoch- und Niedertemperaturtrockner führt gegenüber dem Szenario ‚Heute' bei der Energiebilanz generell und bei der Treibhausgasbilanz im „best case" zu einem Vorzeichenwechsel.
  - 2020: Über die bereits im Szenario ‚2010' möglichen Optimierungen hinaus kann im Jahr 2020 noch der Wirkungsgrad der BtL-Anlage gesteigert werden. Dadurch verbessern sich die Ergebnisse gegenüber ‚2010' nochmals quantitativ, die qualitativen Aussagen bleiben jedoch gleich.
- **Lebensweg 2 (KWK-Pfad)**
  - Heute: Die Wahl des Energieträgers für die Trocknung hat eine vergleichsweise kleine Auswirkung auf die Bandbreiten. Diese werden beim KWK-Pfad, der bereits unter *heutigen* Produktionsbedingungen positive Energie- und Treibhausgasbilanzen aufweist, in erster Linie durch den Wärmenutzungsgrad der KWK-Anlage bestimmt.
  - 2010: Im Jahr 2010 können auch hier optimierte Entwässerungs- und Trocknungstechnologien zum Einsatz kommen, welche die Energiebilanz gegenüber dem Szenario ‚Heute' nochmals deutlich verbessern.

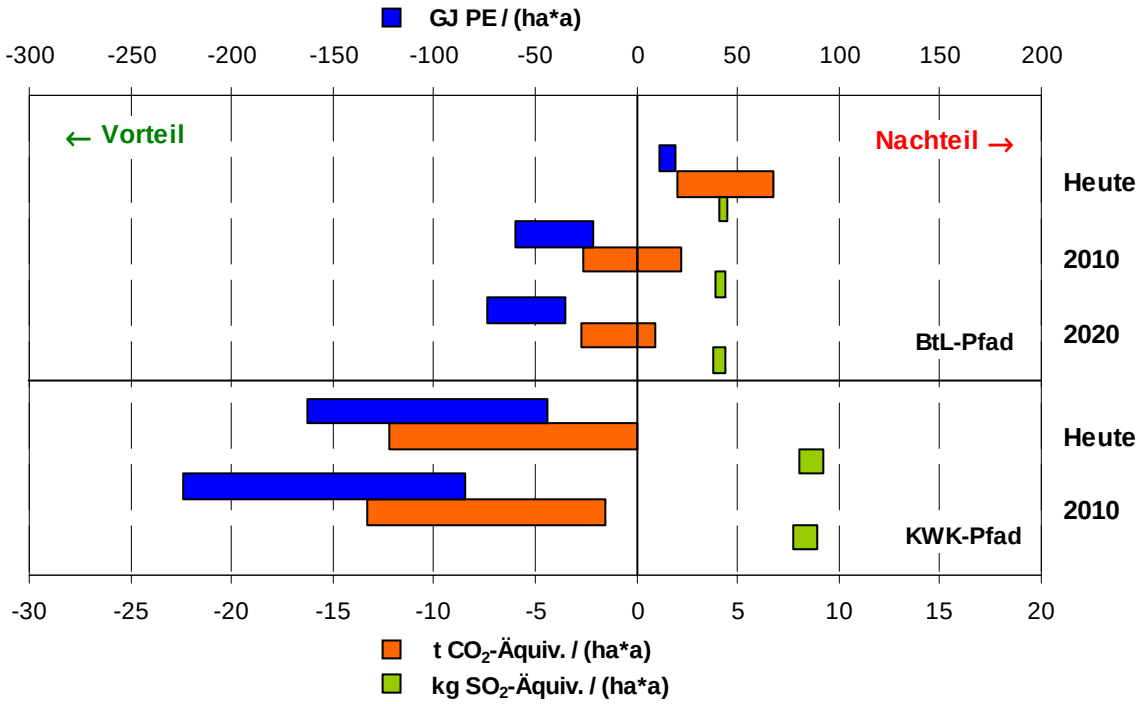


Abb. V.4.5.-1: Umweltwirkungen a) von BtL-Diesel im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff (BtL-Pfad) und b) von Bioenergie im Vergleich zu Strom und Wärme aus fossilen Quellen (KWK-Pfad). Die Ergebnisbandbreiten resultieren aus der Verknüpfung unterschiedlicher Optimierungen für Heute, 2010 und 2020; PE = Primärenergie

Lesebeispiel für den ersten blauen Balken „BtL-Pfad – Heute“ bei Energie:

Das linke Ende des Balkens zeigt das heute mögliche Optimum des BtL-Pfads an, das rechte Ende den ungünstigsten Fall. Wird BtL-Diesel anstelle von fossilem Dieselkraftstoff genutzt, beträgt der energetische Mehraufwand unter heutigen Produktionsbedingungen zwischen 11,4 und 19,3 GJ Primärenergie pro Hektar und Jahr.

Fazit

Die Ergebnisse zeigen, dass BtL-Diesel aus BioLog-Pellets *zukünftig* durchaus zur Schonung energetischer Ressourcen und zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen beitragen kann. Dazu müssten allerdings sämtliche Einzeloptimierungspotenziale entlang des gesamten Lebenswegs ausgeschöpft und miteinander verknüpft werden. Im Hinblick auf Energieeinsparung und Klimaschutz betrifft dies in erster Linie die Konversion und Nutzung der Biomasse, d. h. Pelletproduktion und -nutzung. Beispielsweise ist unter *heutigen* Produktionsbedingungen insbesondere die thermische Trocknung dafür verantwortlich, dass mit BtL-Diesel aus BioLog-Pellets im Gegensatz zu anderen Biokraftstoffen energetische Mehraufwendungen und Mehremissionen an Treibhausgasemissionen verbunden sind.

Die Forderung, sämtliche ergebnisrelevanten Lebenswegabschnitte zu optimieren, gilt natürlich auch für den KWK-Pfad, der aber bereits unter *heutigen* Produktionsbedingungen zum Ressourcen- und Klimaschutz beiträgt. Hier gilt es zukünftig vor allem tragfähige Wärmenutzungskonzepte zu entwickeln, welche die Umweltwirkungen deutlich minimieren.

V.4.6 BioLog-Bioenergieträger versus biogene Energieträger

Nachdem in den vorigen Kapiteln die ökologischen Schwachstellen des BioLog-Konzepts identifiziert und entsprechenden Optimierungspotenziale aufgezeigt wurden, sollen in diesem Kapitel insbesondere die *zukünftig* erzielbaren Ergebnisse für die BioLog-Bioenergieträger den Ergebnissen für andere Bioenergieträger gegenübergestellt werden. Dabei handelt es sich sowohl um alternative Biomasse- als auch Flächennutzungen. Zum einen könnte der BioLog-Biomassemix nicht nur getrocknet, pelletiert und zu BtL-Diesel bzw. Bioenergie umgewandelt werden, sondern nach der Silierung auch als Feuchtgut in einer Biogasanlage verwendet werden. Zum anderen könnten auf derselben Fläche stattdessen auch andere Energiepflanzen wie Pappel-Kurzumtriebsholz oder Triticale-Ganzpflanzen erzeugt und energetisch genutzt werden. In **Abb. V.4.6-1** sind die Vor- und Nachteile der verschiedenen Bioenergieträger gegenüber ihren fossilen Äquivalenten für ausgewählte Umweltwirkungen dargestellt. Die Fehlerbalken bei den KWK-Pfaden zeigen die Bandbreite an, die aus unterschiedlichen Wärmenutzungsgraden resultiert: das linke Ende steht für 80 %, das rechte für 20 %.

Ergebnisse

- **Alternative Biomassenutzung**
  - Unter *zukünftigen* Produktionsbedingungen schneiden BtL-Diesel und als Kraftstoff genutztes Biomethan aus BioLog-Pellets vergleichbar gut ab. Dasselbe gilt auch für die stationäre Strom- und Wärmegewinnung aus BioLog-Pellets, wo der BioLog-KWK-Pfad zu ähnlichen Ergebnissen führt wie Biogas und Biomethan, die dezentral bzw. zentral in einem BHKW genutzt werden (Daten zu Konversionsanlagen siehe Anhang V.10.3).
  - Dies liegt zum einen daran, dass die Pellets in einer KWK-Anlage bei einem elektrischen Wirkungsgrad (η_{el}) von 20 % umgewandelt werden, wohingegen die Silage in einer Biogasanlage zunächst mit einem Wirkungsgrad von ca. 50 % fermentiert und das Biogas anschließend mit η_{el} von 41 % verstromt wird, so dass hier insgesamt auch nur ein Wirkungsgrad von ca. 20 % resultiert. Zum anderen können die hohen Aufwendungen für

die Trocknung der Silage durch einen höheren Wärmenutzungsgrad der KWK-Anlage von 50 % (Biogas-BHKW: 20 %) kompensiert werden. Drittens ist der BioLog-Biomassemix sicher nicht als optimales Biogassubstrat anzusehen.

- **Alternative Flächennutzung**
  - BtL-Diesel aus BioLog-Pellets liefert *zukünftig* ähnlich gute Resultate wie BtL aus Triticale-GP. Die hohen Aufwendungen für die Trocknung der Silage werden durch die hohen Erträge kompensiert. Dagegen schneidet BtL aus Pappel aufgrund der geringeren Aufwendungen beim Energiepflanzenanbau in allen Umweltwirkungen besser ab.

Fazit

Unter *zukünftigen* Produktionsbedingungen können die BioLog-Bioenergieträger mit anderen Bioenergieträgern aus Ganzpflanzen mithalten. Das allgemeine Credo, feuchte Biomasse aus ökologischen Gründen ausschließlich in Feuchtgutlinien (z. B. für Biogas) zu nutzen, konnte unter den hier angesetzten Randbedingungen zumindest teilweise widerlegt werden. Dies soll aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass es mit Ethanol aus Zuckerrübe bereits *heute* Biokraftstoffe gibt, die mehr als doppelt so viele Treibhausgasemissionen vermeiden.

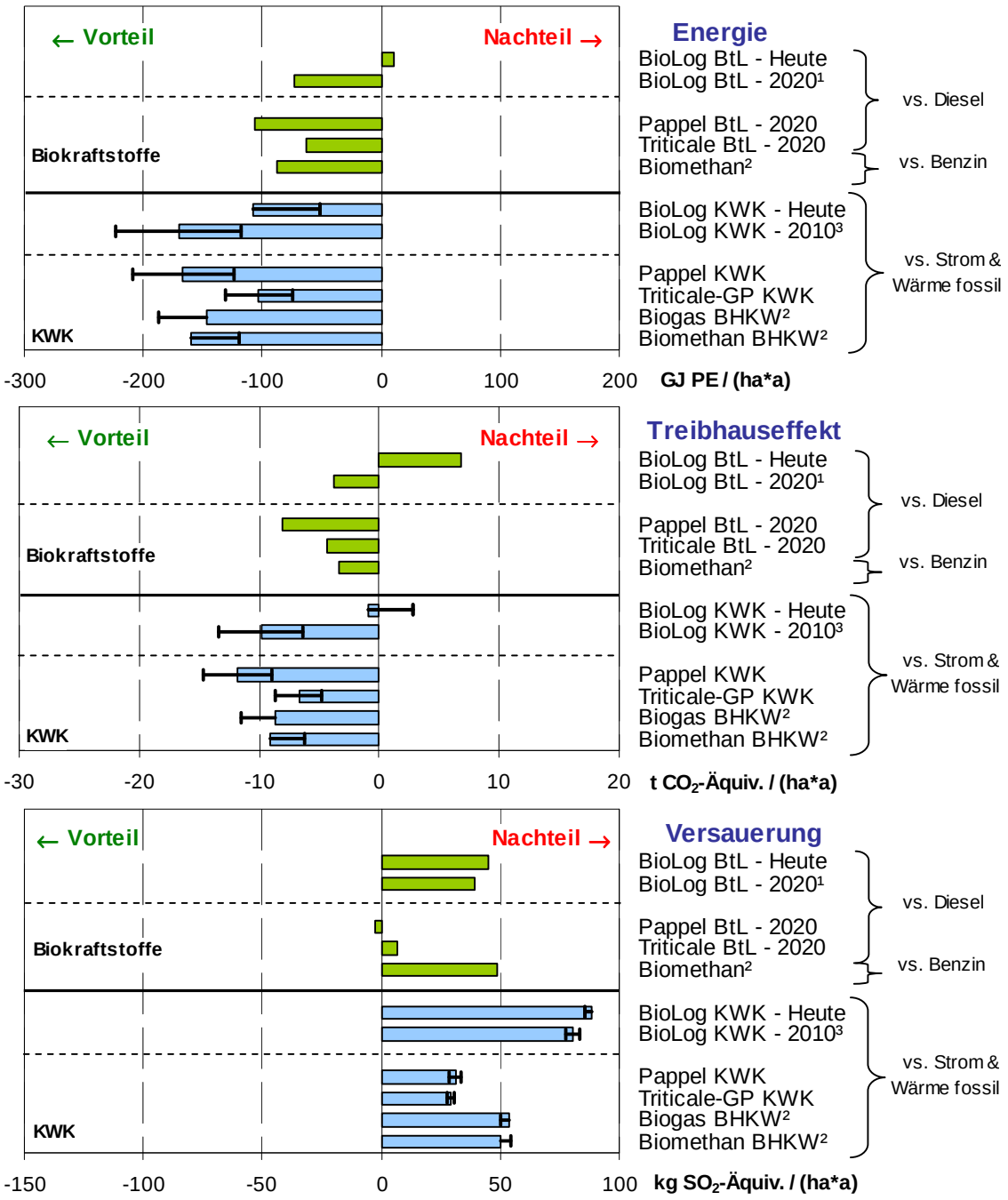


Abb. V.4.6-1: Umweltwirkungen verschiedener Bioenergiepfade im Vergleich zu ihren fossilen Äquivalenten; BHKW = Blockheizkraftwerk, PE = Primärenergie
[1] Energieträger Trocknung Erdgas, Entwäss. 50% TM + HT&NT, BtL-Anlage 2020; [2] Substrat entspricht BioLog-Biomassemix; [3] Energieträger Trocknung Erdgas, Entwäss. 50% TM + HT&NT

Lesebeispiel für den viertletzten Balken „Pappel KWK“ für Treibhauseffekt:

Werden Strom und Wärme aus Pappel-Kurzumtriebsholz erzeugt, 50 % der Wärme genutzt (± 30 %-Pkt.) und damit Strom und Wärme aus fossilen Quellen ersetzt, können pro Hektar und Jahr Emissionen von ca. 11,8 t CO_2-Äquivalenten (± 2,9 t) vermieden werden.

V.5 Zusammenführung und Schlussfolgerungen

Nachfolgend werden die wesentlichen Ergebnisse und Aussagen aus Kapitel V.4 zusammengeführt, einander gegenübergestellt und Schlussfolgerungen abgeleitet. Die eingangs gestellten Fragen dienen dabei als Orientierung:

- Wie ökologisch sind die analysierten BioLog-Bioenergieträger unter *heutigen* Produktionsbedingungen im Vergleich zur Bereitstellung und Nutzung fossiler Kraft- und Brennstoffe?
- Inwiefern können die besonders ergebnisrelevanten Lebenswegabschnitte aus Umweltschutzsicht optimiert werden?
- Wie schneiden die analysierten BioLog-Bioenergieträger unter *zukünftigen* Produktionsbedingungen verglichen mit der Bereitstellung und Nutzung anderer biogener Kraft- und Brennstoffe ab, d. h. im Vergleich zu alternativen Biomasse- und Flächennutzungen?

BioLog-Kraft- und Brennstoffe im Vergleich zu fossilen Energieträgern

Im Rahmen dieser Studie wurden die Umweltwirkungen von BtL-Diesel aus BioLog-Pellets gegenüber fossilem Dieselkraftstoff (BtL-Pfad) und von Bioenergie gegenüber Strom und Wärme aus fossilen Quellen (KWK-Pfad) untersucht.

Der Vergleich zwischen fossilem Dieselkraftstoff und BtL-Diesel aus BioLog-Pellets, welche aus einer Mischung aus Gras-, Roggen- und Maissilage hergestellt werden, fällt unter *heutigen* Produktionsbedingungen zu Ungunsten des Biokraftstoffs aus. Bei allen analysierten Umweltwirkungen treten Nachteile auf – selbst bei Energie und Treibhauseffekt, bei denen Biokraftstoffe üblicherweise besser abschneiden als ihre fossilen Äquivalente. Dies liegt sowohl am Einsatz fossiler Energieträger bei der thermischen Trocknung als auch am Energiepflanzenanbau, welcher beispielsweise durch die Düngemittelproduktion und -ausbringung zum Teil erhebliche Emissionen an stickstoffhaltigen Verbindungen verursacht. Damit ist der BtL-Pfad unter *heutigen* Produktionsbedingungen aus Umweltschutzsicht abzulehnen. Daran würde auch ein Zellaufschluss durch Elektroporation anstelle von Silierung oder die Änderung der Pelletwerkgröße nichts ändern, wie Sensitivitäts- und Variantenanalysen zeigen.

Werden die BioLog-Pellets dagegen in einer Anlage mit Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt und somit Strom und Wärme aus fossilen Quellen ersetzt, zeigen die Ergebnisse ein Muster, das bereits von den Vergleichen vieler anderer Bioenergieträger mit ihren fossilen Äquivalenten bekannt ist: Tendenzielle Vorteile bei der Schonung energetischer Ressourcen und bei der Vermeidung von Treibhausgasemissionen, während bei den anderen Umweltwirkungen tendenziell Nachteile auftreten. Die Treibhausgasbilanz ist allerdings unter *heutigen* Produktionsbedingungen nur geringfügig positiv. Damit kann keine objektive, wissenschaftlich begründete Entscheidung für oder gegen den KWK-Pfad gefällt werden. Erst wenn zusätzliche Kriterien herangezogen bzw. subjektive Bewertungsverfahren angewandt werden, kann eine Aussage getroffen werden. Misst man beispielsweise der Schonung energetischer Ressourcen und dem Treibhauseffekt eine höhere ökologische Priorität bei als anderen Umweltwirkungen, ließe sich eine positive Bewertung des KWK-Pfads begründen.

Beide untersuchten Pfade könnten jedoch *zukünftig* wesentlich besser bewertet werden, wenn es gelingt, die Pelletproduktion und -nutzung zu optimieren.

Optimierung der besonders ergebnisrelevanten Lebenswegabschnitte

Bei den meisten Ökobilanzen haben einzelne Lebenswegabschnitte einen unterschiedlich großen Einfluss auf die Gesamtergebnisse, so auch bei den Lebenswegvergleichen von BtL-Diesel aus BioLog-Pellets gegenüber fossilem Dieselkraftstoff bzw. Bioenergie gegenüber Strom und Wärme aus fossilen Quellen. Im Folgenden sind die Lebenswegabschnitte nach ihrem direkten Einfluss geordnet:

- Geringer Einfluss: Ernte, Silierung, Silage- und Pellettransport sowie mechanische Entwässerung (wobei sich letztere allerdings indirekt auf die thermische Trocknung auswirkt)
- Mittlerer Einfluss: Presssaftvergärung, Pelletierung sowie Pelletnutzung für BtL
- Großer Einfluss: Anbau, thermische Trocknung sowie Pelletnutzung für KWK

Dieser Einfluss kann bei den einzelnen Umweltwirkungen unterschiedlich stark ausgeprägt sein. Beispielsweise ist der Einfluss des Energiepflanzenanbaus in allen Umweltwirkungen deutlich erkennbar (vor allem bei Versauerung, Nährstoffeintrag und Lachgas), während sich die thermische Trocknung insbesondere bei Energie und Treibhauseffekt niederschlägt. Werden die Pellets zur Strom- und Wärmegewinnung (KWK-Pfad) eingesetzt, wirkt sich dies deutlich negativ auf Versauerung, Nährstoffeintrag und Lachgas aus.

Mit Blick auf die sehr große ökologische Priorität der Umweltwirkung Treibhauseffekt wären also Optimierungen besonders dort lohnenswert, wo sie zu einer deutlichen Reduzierung der Treibhausgasemissionen beitragen. Im Fall der BioLog-Kraft- und Brennstoffe sind dies die besonders ergebnisrelevanten Lebenswegabschnitte thermische Trocknung und Pelletnutzung. Für sie wurden auf Basis von Experteneinschätzungen Szenarien entwickelt, die im Fall der thermischen Trocknung sogar kurzfristig (2010), im Fall der BtL-Produktion wohl aber erst mittelfristig (2020) umsetzbar wären. Der Energiepflanzenanbau wurde nicht weiter betrachtet, da der Biomassemix durch das BioLog-Konzept vorgegeben war. Hier würde lediglich der Anbau von Kurzumtriebsholz, welcher mit geringeren landwirtschaftlichen Aufwendungen verbunden ist, oder der Einsatz von Reststoffen wie Stroh oder Waldrestholz zu besseren Ökobilanzergebnissen führen.

- **Thermische Trocknung**: Die thermische Trocknung kann in zweifacher Hinsicht optimiert werden, zum einen durch die Wahl des fossilen Energieträgers, zum anderen durch Verbesserung der Entwässerungs- und Trocknungstechnologie.
  - Wahl des fossilen Energieträgers: Aus Klimaschutzsicht sollte anstelle von Braunkohle unbedingt Erdgas als Energieträger für die thermische Trocknung verwendet werden, da dadurch die Treibhausgasbilanz wesentlich verbessert wird. Letztendlich führt diese Maßnahme aber noch zu keiner *qualitativen* Verbesserung der Bilanzergebnisse.
  - Entwässerungs- und Trocknungstechnologie: Es wurden drei kurzfristig (2010) verfügbare Technologien analysiert, die alle zu einer deutlichen Reduzierung des Energieaufwands führen würden. Sehr viel versprechend ist eine stärkere mechanische Entwässerung auf 50 % TM-Gehalt sowie eine Kombination aus Hoch- und Niedertemperaturtrockner, die jeweils für sich genommen nur eine Verbesserung der im Basisfall (Heute) negativen Treibhausgasbilanz von BtL-Diesel zur Folge hätten. Erst durch die Verknüpfung der beiden genannten Maßnahmen kommt es zu einem Vorzeichenwechsel, d. h. zu Netto-Treibhausgaseinsparungen. Ob ein TM-Gehalt von 50 % jedoch mit einer Schneckenpresse erreichbar ist, muss erst noch unter Beweis gestellt werden.

- **Pelletnutzung**: Die Pelletnutzung kann sowohl im Falle einer BtL-Produktion als auch bei thermischer Nutzung verbessert werden. Dies betrifft einerseits den Wirkungsgrad der BtL-Anlage, andererseits den Wärmenutzungsgrad der KWK-Anlage.
  - Wirkungsgrad BtL-Produktion: Mittelfristig (2020) werden deutlich verbesserte Wirkungsgrade für BtL-Anlagen erwartet, welche zumindest in einer positiven Energiebilanz resultieren würden. Obwohl diese Optimierung für sich genommen noch nicht zu einer positiven Treibhausgasbilanz führt, ist sie dennoch ein wichtiger Baustein auf dem Weg dorthin.
  - KWK-Wärmenutzungsgrad: Aus Umweltschutzsicht ist bei KWK-Anlagen unbedingt ein hoher Wärmenutzungsgrad anzustreben. Sollte eine solche Anlage basierend auf dem BioLog-Konzept umgesetzt werden, sollten potenzielle Wärmesenken bei der Planung berücksichtigt werden, u. a. bei der Standortwahl und Anlagendimensionierung.

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass alle Anstrengungen unternommen werden sollten, sämtliche Einzeloptimierungspotenziale entlang des gesamten Lebenswegs auszuschöpfen und miteinander zu verknüpfen. Gelingt dies, würde die Bewertung der untersuchten Pfade *zukünftig* wesentlich positiver ausfallen.

BioLog-Kraft- und Brennstoffe im Vergleich zu anderen biogenen Energieträgern

Die analysierten Pfade stehen trotz *zukünftig* möglicherweise vorteilhafterer Ergebnisse in direkter Konkurrenz zu anderen Biomasse- und Flächennutzungen. Zum einen könnte der BioLog-Biomassemix nicht nur getrocknet, pelletiert und zu BtL-Diesel bzw. Bioenergie umgewandelt werden, sondern nach der Silierung auch als Feuchtgut in einer Biogasanlage verwendet werden. Zum anderen könnten auf derselben Fläche stattdessen auch andere Energiepflanzen wie Pappel oder Triticale erzeugt und energetisch genutzt werden.

- **Alternative Biomassenutzung**: Unter *zukünftigen* Produktionsbedingungen schneiden BtL-Diesel und als Kraftstoff genutztes Biomethan aus BioLog-Pellets vergleichbar gut ab. Dasselbe gilt auch für die stationäre Strom- und Wärmegewinnung aus BioLog-Pellets, wo der BioLog-KWK-Pfad zu ähnlichen Ergebnissen führt wie Biogas und Biomethan, die dezentral bzw. zentral in einem BHKW genutzt werden. Allerdings ist der BioLog-Biomassemix sicher nicht als optimales Biogassubstrat anzusehen.
- **Alternative Flächennutzung**: BtL-Diesel aus BioLog-Pellets liefert *zukünftig* ähnlich gute Resultate wie BtL aus Triticale. Die hohen Aufwendungen für die Trocknung der Silage werden durch die hohen Erträge kompensiert. Dagegen schneidet BtL aus Pappel aufgrund geringerer landwirtschaftlicher Aufwendungen in allen Umweltwirkungen besser ab.

Unter *zukünftigen* Produktionsbedingungen können die untersuchten Pfade durchaus mit anderen Bioenergieträgern aus Ganzpflanzen mithalten. Dabei konnte das allgemeine Credo, feuchte Biomasse aus ökologischen Gründen ausschließlich in Feuchtgutlinien (z. B. für Biogas) zu nutzen, unter den hier angesetzten Randbedingungen zumindest teilweise widerlegt werden. Dies soll aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass es mit Bioethanol aus Zuckerrübe bereits *heute* Biokraftstoffe gibt, die mehr als doppelt so viele Treibhausgasemissionen vermeiden. Inwiefern das BioLog-Konzept auch unter ökonomischen und logistischen Gesichtspunkten mit den etablierten Biokraftstoffen und -brennstoffen wie Biodiesel, Bioethanol oder Biogas konkurrieren kann, muss die ökonomische Begleitforschung zeigen.

Ausblick

Die hier abgeleiteten und dargestellten Ergebnisse können als qualitativ robust angesehen werden und ermöglichen damit zuverlässige Richtungsaussagen für das BioLog-Konzept. Streng genommen gelten sie (insbesondere im quantitativen Sinn) aber nur unter den gesetzten Randbedingungen. Dazu zählen neben dem zugrunde gelegten Biomassemix vor allem auch die auf Basis von Experteneinschätzungen angesetzten Wirkungsgrade zukünftiger Entwässerung- und Trocknungstechnologien sowie BtL-Anlagen, welche zum Teil erst noch unter Beweis gestellt werden müssen. Daher können die Ergebnisse nicht ohne weiteres auf andere nachwachsende Rohstoffe oder Konversionstechnologien übertragen werden.

Obwohl ihr Einfluss letztendlich relativ gering ist, gelten ähnliche Einschränkungen auch für die angesetzte Kuppelproduktnutzung, bei der einige technische und rechtliche Fragen noch ungelöst sind. Beispielsweise muss geklärt werden, inwiefern die Ausbringung von Gärrest und insbesondere Filterasche im Rahmen der Düngemittelverordnung (DüMV) zulässig und ggf. auch technisch umsetzbar ist (Staubbildung bei Ascheausbringung). Außerdem ist noch offen, ob BioLog-Pellets im Sinne der 1. Bundesimmissionsschutzverordnung als Brennstoff für (Klein-) Feuerungsanlagen zwischen 15 und 100 kW anerkannt würden. Diese könnten eine (dezentrale) Alternative zu einer möglicherweise nicht realisierbaren, zentralen KWK-Anlage darstellen. Für größere Anlagen zwischen 100 kW und 50 MW (Geltungsbereich der 4. BImSchV) scheint dies zumindest kein Problem zu sein, allerdings könnten strenge Auflagen der TA Luft aufwändige Rauchgasreinigungssysteme für Anlagen mit BioLog-Pelletfeuerung erforderlich machen.

Im Sinne einer Nachhaltigkeitsbewertung, welche ökologische, ökonomische und soziale Komponenten untersucht, muss bei einer umfassenden ökologischen Bewertung – leider allzu oft reduziert auf Klimaschutzaspekte – beispielsweise auch die Vereinbarkeit mit Naturschutzzielen überprüft werden. Inwiefern eine Flächenbindung von 60.000 – 65.000 ha wie beim BioLog-Konzept z. B. in punkto biologische Vielfalt akzeptabel ist, müsste separat analysiert werden, da solche Fragestellungen nicht Gegenstand der Untersuchung waren.

Nichtsdestotrotz zeigen die Ergebnisse der Übersichtsökobilanzen, dass die nach dem BioLog-Konzept hergestellten Kraft- und Brennstoffe mittelfristig ein durchaus beachtenswertes ökologisches Potenzial besitzen. Allerdings stehen sie auch in Konkurrenz zu anderen, aus Umweltschutzsicht vorteilhaften Alternativen der energetischen und stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Damit könnte das BioLog-Konzept zukünftig durchaus zu einem Baustein einer ökologisch effizienten Biomasseallokation werden. Es sollte daher stetig aber behutsam weiterentwickelt werden.

V.6 Literatur und Abkürzungen

Literatur

/A. Kahl 2008/ Sternowsky, S.: Ermittlung der optimalen maschinentechnischen Parameter zur Trocknung der Silagen sowie zur Herstellung von marktgerechten Brennstoff-Formkörpern. Abschlussbericht BioLog-Teilvorhaben 5, Amandus Kahl GmbH & Co KG, Reinbek, 2008.

/Abdoun 2008/ Herr E. Abdoun, Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik, Johann Heinrich von Thünen Institut (vTI), persönliche Mitteilungen, 2008.

/Anhydro 2008/ Rinder, R.: Entwässerung aufbereiteter Produkte aus dem Energiepflanzenanbau. Abschlussbericht BioLog-Teilvorhaben 3, Anhydro GmbH, Kassel, 2008.

/ATB 2008/ Scholz, V., Idler, C., Daries, W. & Poschmann, T.: Entwicklung und Erprobung einer neuen Verfahrenslinie zur Herstellung von Energiepellets aus Ganzpflanzensilage sowie Ermittlung der Leistungsparameter und des Energieaufwandes. Abschlussbericht BioLog-Teilvorhaben 2 mit Beitrag zu Teilvorhaben 7, Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB), Potsdam-Bornim, 2008.

/Beck 2008/ Frau J. Beck (TLL), persönliche Mitteilungen, 2008.

/Borken et al. 1999/ Borken, J., Patyk, A. & Reinhardt, G.A.: Basisdaten für ökologische Bilanzierungen. Einsatz von Nutzfahrzeugen in Transport, Landwirtschaft und Bergbau. Vieweg, Braunschweig / Wiesbaden, 1999.

/CML 2004/ Institute of Environmental Sciences (CML). CML's impact assessment methods and characterisation factors. Department of Industrial Ecology, Leiden, 2004.

/DIN 2006/ Deutsches Institut für Normung e. V.: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006) / Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006). Beuth Verlag, Berlin, 2006.

/FNR 2009/ Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR): Projekt-Grafik BioLog. Download: http://www.energiepflanzen.info/cms35/Projekt-Grafik.1608.0.html

/FZK 2008/ Sack, M., Eing, C., Buth, L., Berghöfer, T., Attmann, F., Stängle, R., Wolf, A., Frey, W., Müller, G. & Bluhm, H.-J.: Konditionierung grüner Biomasse durch elektroporationsunterstützte Entwässerung. Abschlussbericht BioLog-Teilvorhaben 1, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (FZK), Karlsruhe, 2008.

/IFEU 2009/ Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg: IFEU-interne Berechnungen und Datenbankabfragen. Heidelberg, 2009.

/IFEU et al. 2008/ Vogt, R., Gärtner, S., Münch, J., Reinhardt, G., Köppen, S. et al. (2008): Optimierungen für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. Gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), FKZ 0327544. IFEU, IE, FHW Berlin, Öko-Institut, TU Berlin & Peters Umweltplanung. Heidelberg / Leipzig / Berlin / Darmstadt, 2008.

/IFEU 2006/ Reinhardt, G., Gärtner, S., Patyk, A. & Rettenmaier, N.: Ökobilanzen zu BTL – Eine ökologische Einschätzung. Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), FKZ 2207104. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU), Heidelberg, 2006.

/IPPC 2007/ IPCC Fourth Assessment Report, Chapter 2, Changes in Atmospheric Constituents and Radiative Forcing, 129-234, 2007.

/Klöpffer & Renner 1995/ Klöpffer, W. & Renner, I: Methodik der Wirkungsbilanz im Rahmen von Produkt-Ökobilanzen unter Berücksichtigung nicht oder nur schwer quantifizierbarer

Umwelt-Kategorien. In: Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen – Wirkungsbilanz und Bewertung. Umweltbundesamt (UBA), Berlin, 1995.

/Leeuw 2002/ Leeuw, F.D.: A set of emission indicators for long-range transboundary air pollution. Bilthoven, 2002.

/Rinder 2008/ Herr R. Rinder (Anhydro), persönliche Mitteilungen, 2008.

/Sternowsky 2008/ Herr Dr. S. Sternowsky (A. Kahl), persönliche Mitteilungen, 2008.

/TLL 2008/ Beck, J. & Vetter, A.: Überlegungen zur standortangepassten Größe eines Trockenwerkes zur Produktion von Energiepflanzenpellets. Projektinterner Bericht BioLog-Teilvorhaben 7, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Jena, 2008.

/UBA 1999/ Umweltbundesamt (Hrsg.): Bewertung in Ökobilanzen: Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043. Berlin, 1999.

/Vodegel 2008/ Herr Dr. S. Vodegel, Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH (CUTEC), persönliche Mitteilungen, 2008.

V.7 Abkürzungen

Abkürzung	Langfassung	Erläuterung
a	lat. annum (Jahr)	
Äquiv.	Äquivalent(e)	
BHKW	Blockheizkraftwerk	Anlage zur Erzeugung von Strom und Wärme
BtL	Biomass-to-Liquid	Umwandlung von Biomasse in flüssigen Kraftstoff
CH_4	Methan	
CO_2	Kohlenstoffdioxid	
FM	Frischmasse	Substanz im (ernte-)frischen Zustand
FT-(Synthese)	Fischer-Tropsch-(Synthese)	Syntheseverfahren zur Umwandlung von Synthesegas in flüssige Kohlenwasserstoffe
GJ	Gigajoule	= 10^9 Joule = 10^9 Ws
GuD-(KW)	Gas- und Dampf-(Kraftwerk)	
ha	Hektar	= 10^4 m^2
kWh	Kilowattstunde	= 10^3 Wh = 3.600.000 Ws = 3,6 MJ
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung	Gleichzeitige Erzeugung von Strom und Wärme
MW	Megawatt	= 10^6 W = 10^6 Js^{-1}
MW_{el}	Megawatt elektrisch	Endenergie (Leistung) in Form von Strom
MW_{th}	Megawatt thermisch	Endenergie (Leistung) in Form von Wärme
N_2O	Distickstoffoxid	Lachgas
PSM	Pflanzenschutzmittel	
THG	Treibhausgas(e)	
TM	Trockenmasse	

V.8 Abbildungsverzeichnis

Abb. V.1-1	Biokraftstoff- bzw. Bioenergiegewinnung nach dem BioLog-Konzept /FNR2009/	S. 139
Abb. V.1-2	Vereinfachter schematischer Lebenswegvergleich zwischen fossilem Dieselkraftstoff und BtL-Diesel aus BioLog-Pellets (Mischung aus Gras Roggen und Mais)	S. 140
Abb. V.3.1-1	Lebenswegvergleich zwischen fossilem Dieselkraftstoff und BtL-Diesel, der nach dem BioLog-Konzept erstellt wird.	S. 147
Abb. V.3.2-1	Lebenswegvergleich zwischen herkömmlich gewonnener Energie und Strom & Wärme, die nach dem BioLog-Konzept gewonnen wird.	S. 148
Abb. V.3.3.1-1	Lebenswegvergleich zwischen fossilem Dieselkraftstoff und BtL-Diesel, der nach dem BioLog-Konzept unter Einbeziehung der Elektroporation (rot) hergestellt wird.	S. 150
Abb. V.4.1.1-1	Detaillierte Ergebnisse des Lebenswegvergleichs a) von BtL-Diesel mit fossilem Dieselkraftstoff und b) von Bioenergie mit Strom und Wärme aus fossilen Quellen für die Umweltwirkung Treibhauseffekt	S. 153
Abb. V.4.1.2-1	Umweltwirkungen a) von BtL-Diesel im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff (BtL-Pfad) und b) von Bioenergie im Vergleich zu Strom und Wärme aus fossilen Quellen (KWK-Pfad); PE = Primärenergie	S. 155
Abb. V.4.2.1-1	Umweltwirkungen von BtL-Diesel im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff bei Zellaufschluss durch Silierung bzw. Elektroporation ; PE = Primärenergie	S. 158
Abb. V.4.2.2-1	Umweltwirkungen von BtL-Diesel im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff in Abhängigkeit der Größe der dezentralen Pelletwerke; PE = Primärenergie	S. 160
Abb. V.4.3.1-1	Umweltwirkungen von BtL-Diesel im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff in Abhängigkeit des Energieträgereinsatzes bei der Trocknung; PE = Primärenergie	S. 162
Abb. IV.4.3.2-1	Umweltwirkungen von BtL-Diesel im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff in Abhängigkeit verschiedener Trocknungstechnologien; PE = Primärenergie	S. 164
Abb. V.4.4-1	Umweltwirkungen a) von BtL-Diesel im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff (BtL-Pfad) und b) von Bioenergie im Vergleich zu Strom und Wärme aus fossilen Quellen (KWK-Pfad); in Abhängigkeit des Wirkungsgrades der BtL-Anlage und der KWK-Wärmenutzung; PE = Primärenergie	S. 166

Abb. V.4.5-1 Umweltwirkungen a) von BtL-Diesel im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff (BtL-Pfad) und b) von Bioenergie im Vergleich zu Strom und Wärme aus fossilen Quellen (KWK-Pfad).Die Ergebnisbandbreiten resultieren aus der Verknüpfung unterschiedlicher Optimierungen für Heute, 2010 und 2020; PE = Primärenergie S. 168

Abb. V.4.6-1 Umweltwirkungen verschiedener Bioenergiepfade im Vergleich zu ihren fossilen Äquivalenten; BHKW = Blockheizkraftwerk; PE = Primärenergie S. 171

V.9 Tabellenverzeichnis

Tab. V.2-1 Indikatoren, Sachbilanzgrößen und Äquivalenzfaktoren zu den untersuchten Umweltwirkungen S. 143

Tab. V.2-2 Indikatoren, Sachbilanzgrößen und Äquivalenzfaktoren zu den untersuchten Umweltwirkungen (/CML 2004/, /IPCC 2007/, /Klöpffer & Renner 1995/, /Leeuw 2002/, /IFEU 2009/ auf der Basis von /IPCC 2007/) S. 144

V.10 Anhang

V.10.1 BtL-Pfad: Ergebnisse der Übersichtsökobilanzen

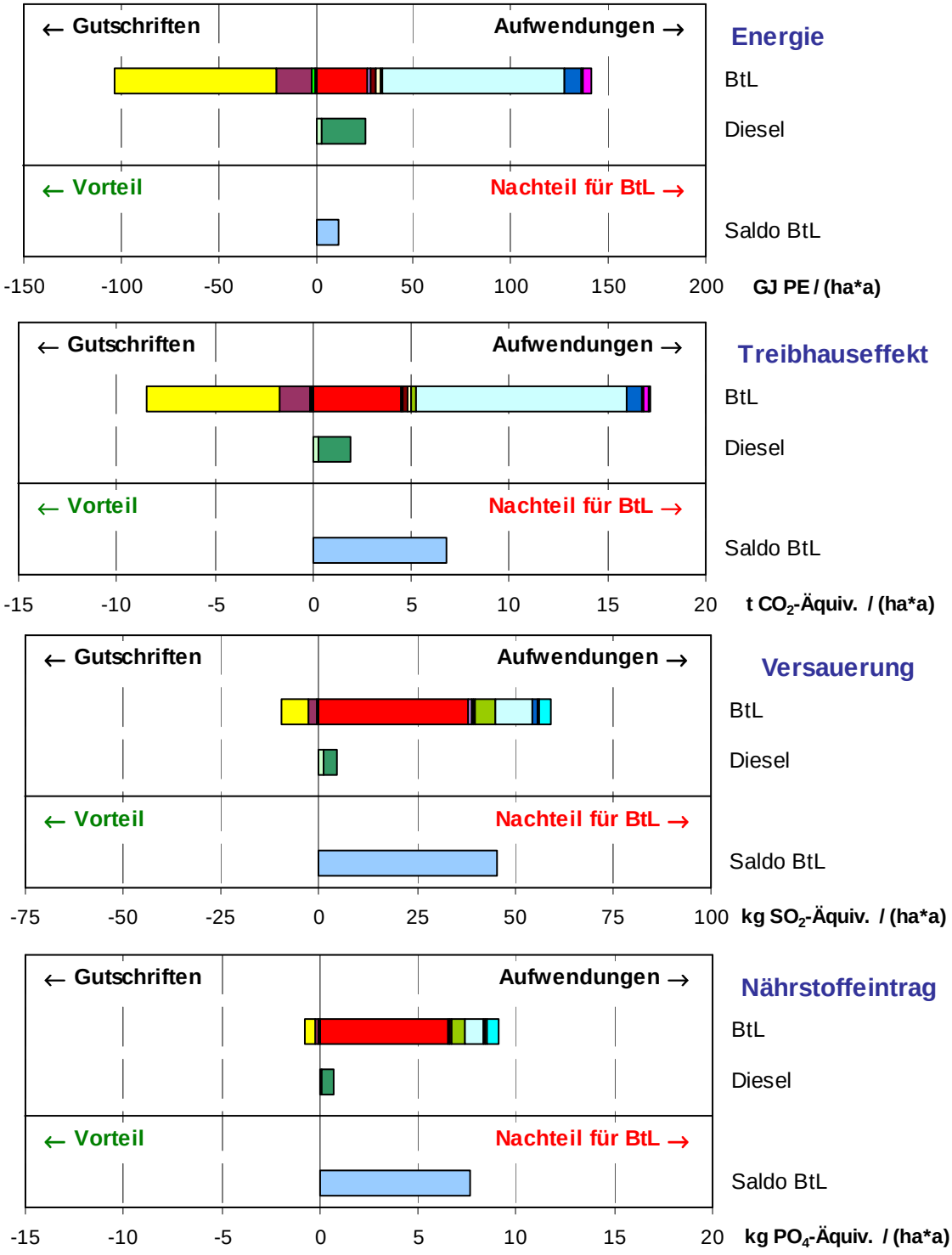


Abb. V.10.1-1: Umweltwirkungen von BtL-Diesel im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff (BtL-Pfad); PE = Primärenergie, Legende siehe rechte Seite

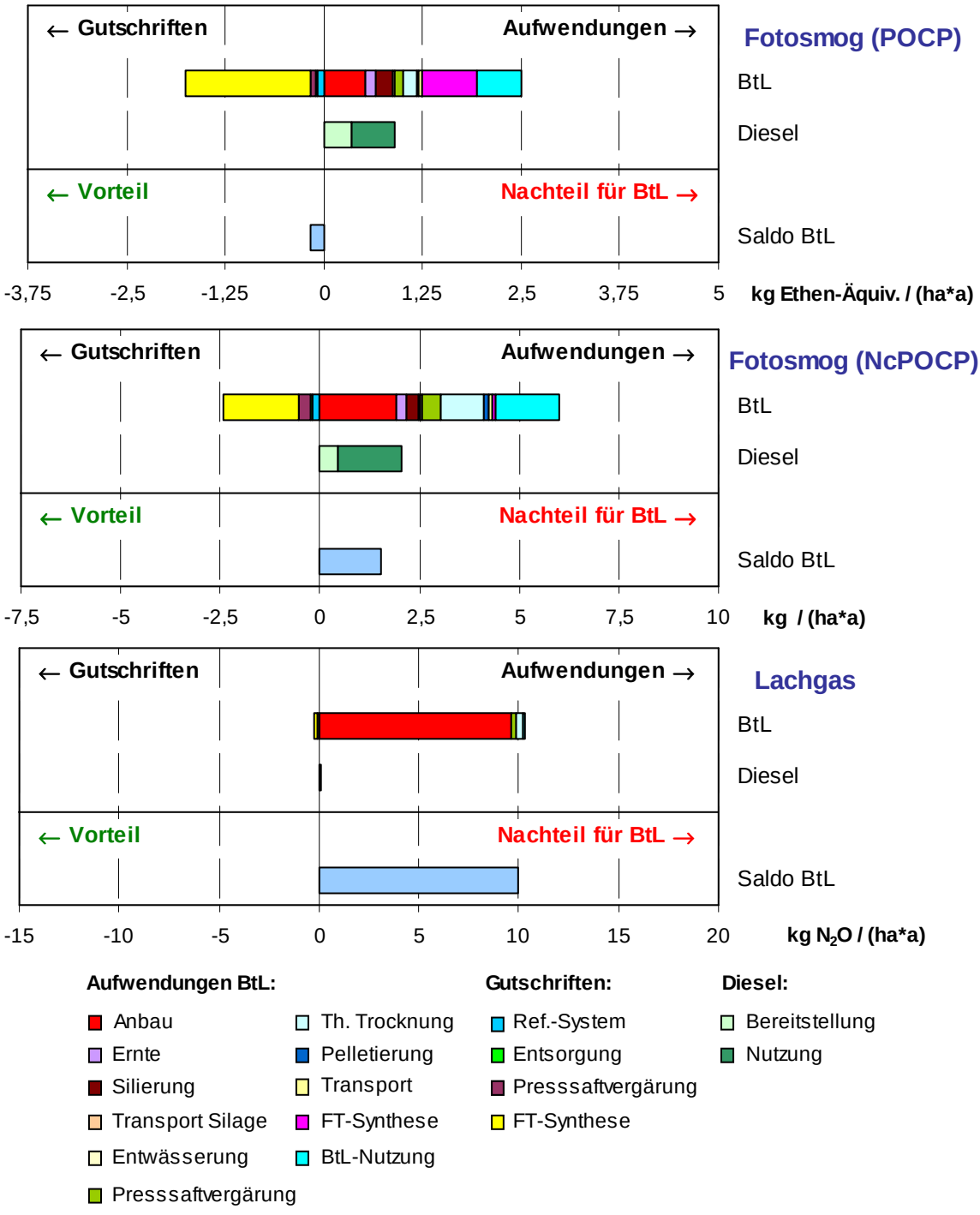


Abb. V.10.1-2: Fortsetzung der Umweltwirkungen von BtL-Diesel im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff (BtL-Pfad)

V.10.2 KWK-Pfad: Ergebnisse der Übersichtsökobilanzen

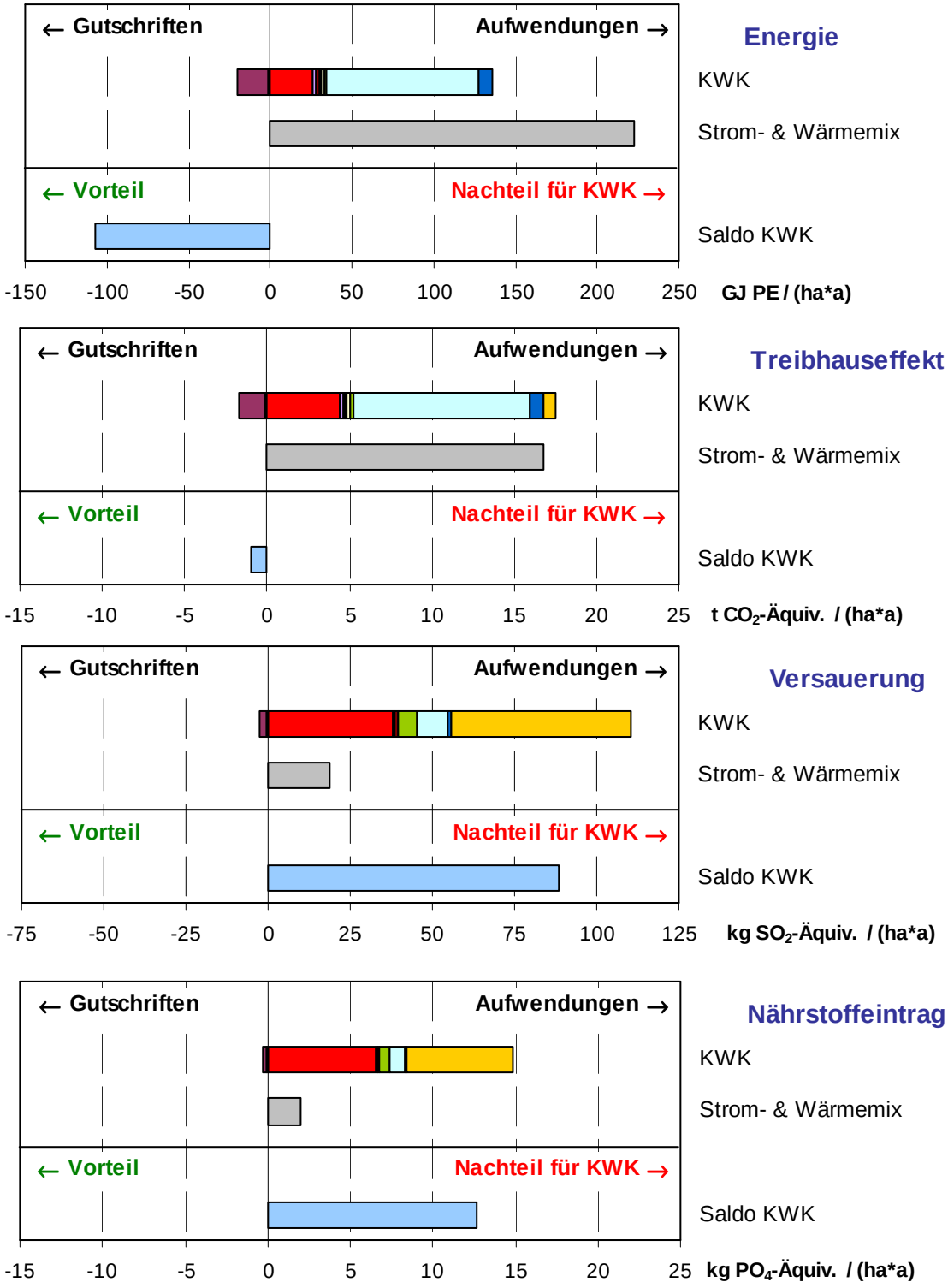


Abb. V.10.2-1: Umweltwirkungen von Bioenergie im Vergleich zu Strom und Wärme aus fossilen Quellen (KWK-Pfad); PE = Primärenergie, Legende siehe rechte Seite

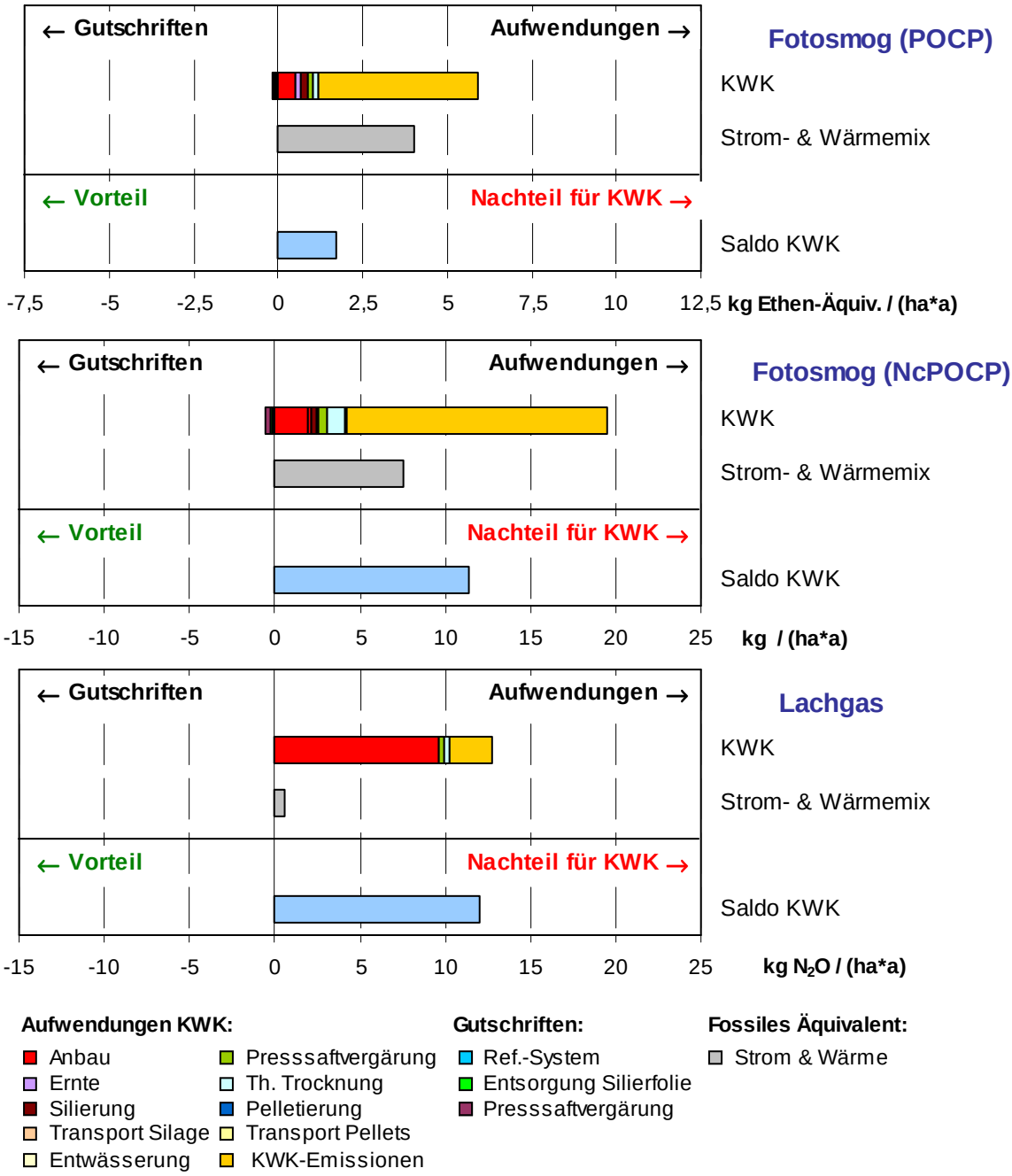


Abb. V.10.2-2: Fortsetzung der Umweltwirkungen von Bioenergie im Vergleich zu Strom und Wärme aus fossilen Quellen (KWK-Pfad)

V.10.3 Ausgewählte Basisdaten für verschiedene Bioenergiepfade

Tab. V.10.3-1: Energiepflanzenerträge, Trockenmassegehalte und Daten zu Konversionsanlagen für verschiedene Biokraftstoffpfade (/Vodegel 2008/, /IFEU 2009/)

		Ertrag	TM-Gehalt	Wirkungsgrad η			Leistung
		t TM / (ha*a)	%	BtL	Naphtha	Wachse	MW
BioLog Heute	BtL	14,9 (Pellets)	89	10 %	7 %	8 %	500 MW_{FWL}
BioLog 2020	BtL	14,9 (Pellets)	89	15 %	11 %	9 %	500 MW_{FWL}
Biomethan* Kraftstoff		16,4 (Silage)	34,6 (Ø)	-	-	-	2 MW_{el}, Aufbereit. mit PSA
Pappel 2020	BtL	12,5	80	50 %	-	-	-
Triticale 2020	BtL	12,6	85	50 %	-	-	-

* Produktion in Biogasanlage mit abgedecktem Gärrestlager; PSA = Pressure Swing Adsorption (Druckwechseladsorption)

Tab. V.10.3-2: Energiepflanzenerträge, Trockenmassegehalte und Daten zu Konversionsanlagen für verschiedene Bioenergiepfade (/IFEU 2009/)

		Ertrag	TM-Gehalt	Wirkungsgrad			Leistung	Wärmenutzung (Std.)
		t TM / (ha*a)	%	η_{el}	η_{th}	η_{ges}	MW	
BioLog Heute	KWK	14,9 (Pellets)	89	20 %	62 %	82 %	50 MW_{FWL}	50 %
BioLog 2010	KWK	14,9 (Pellets)	89	20 %	62 %	82 %	50 MW_{FWL}	50 %
Biogas* BHKW		16,4 (Silage)	34,6 (Ø)	41 %	43 %	84 %	2 MW_{el}, Aufbereit. mit PSA	20 %
Biomethan* BHKW		16,4 (Silage)	34,6 (Ø)	41 %	43 %	84 %	2 MW_{el}, Aufbereit. mit PSA	80 %
Pappel	KWK	12,5	80	20 %	62 %	82 %	50 MW_{FWL}	50 %
Triticale	KWK	12,6	85	20 %	62 %	82 %	50 MW_{FWL}	50 %

* Produktion in Biogasanlage mit abgedecktem Gärrestlager; PSA = Pressure Swing Adsorption (Druckwechseladsorption)

VI. Unterschrift

Clausthal-Zellerfeld, den 04.03.2009	ppa S. Vodegel
Ort, Datum	Dr.-Ing. Stefan Vodegel